



**Helena Gil Martins Monitorização das condições de operação de uma
de Faria Gomes fornalha com grelha móvel para combustão de
 biomassa**



**Helena Gil Martins
de Faria Gomes**

**Monitorização das condições de operação de uma
fornalha com grelha móvel para combustão de
biomassa**

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizado sob a orientação científica do Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Professora Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Vogais

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
(Orientador)

Professor Doutor Vítor António Ferreira da Costa

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
(arguente)

agradecimentos

- Ao meu Orientador, Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, pela partilha de conhecimento e acompanhamento durante o meu Estágio;
- À Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda, pela oportunidade de Estágio e contribuição para a minha formação académica, profissional e pessoal, em particular ao Engenheiro João Couto, Engenheiro Manuel Cunha, Engenheiro Rui Fartura, Engenheiro Filipe Silva e ao Doutor Fernando Santos. Agradeço ainda ao corpo da empresa, incluindo os funcionários das mais diversas áreas;
- À minha supervisora na empresa, Engenheira Liliana Valente, pela ajuda, disponibilidade e presença durante todo o tempo que estive na empresa;
- Aos meus pais, Elsa e Rogério, por todo o apoio, amor e carinho que me deram na minha vida e por toda a confiança que me transmitiram durante o meu percurso académico, um especial agradecimento;
- Ao meu irmão, Vasco, por me fazer rir e por todos os momentos de diversão;
- Ao Luís, por toda a paciência, ajuda, amor, dedicação e carinho demonstrados durante estes anos, um especial agradecimento;
- À Patrícia, amiga de coração, por todas as conversas e tardes de estudo, pela amizade e força, um especial agradecimento;
- À Isabel, Sara, Joana, Maria João e Andreia por todos os momentos de convívio e boa disposição, pela amizade demonstrada;
- À Universidade de Aveiro, em particular ao Departamento de Ambiente e Ordenamento, onde fui acolhida por todos os membros do corpo docente e funcionários;
- A todos os meus colegas que, de alguma maneira, participaram no meu percurso académico e me ajudaram a singrar;
- Por último, mas não menos importante, à Professora Doutora Margarida Marta da Escola Superior de Educação do Porto, por todo o apoio, ajuda e amizade.

palavras-chave

Biomassa, combustão, leito fixo, fornalha, grelha móvel, monitorização, ar primário, excesso de ar, movimentação das grelhas

resumo

Utilizado há milhares de anos em contexto energético, o processo de conversão termoquímica – combustão – aplicado a biomassa apresenta diversas vantagens, salientando-se o aproveitamento energético através de um recurso renovável e neutro na perspetiva do CO₂. Todavia, encontram-se inconvenientes relacionados com a emissão de poluentes nocivos para o ambiente e para a saúde do ser humano. Desta forma, o objetivo deste trabalho focou-se na monitorização das condições de operação do processo de combustão, com o intuito de encontrar as condições, para os parâmetros testados, que minimizem os impactos associados ao processo.

Para a realização deste trabalho efetuou-se a combustão de pellets de madeira numa caldeira de leito fixo de média potência (581 kW_{th}), que integra um sistema de alimentação sem-fim, uma fornalha com grelha móvel reciprocating e dois permutadores de calor para o aquecimento de água (um horizontal e um vertical). O sistema inclui ainda um multiciclone para o despoejamento do efluente gasoso e um ventilador para a extração dos gases para o exterior pela chaminé.

Para a obtenção do ponto de operação que minimize as emissões de CO e NO, foram analisados três parâmetros distintos: distribuição de ar primário na fornalha, excesso de ar e movimentação das grelhas. O procedimento experimental baseou-se na variação das percentagens de ar primário nas três secções da grelha, fixando os ciclos de trabalho das mesmas, com a finalidade de determinar o ponto de funcionamento mais adequado para as condições testadas. Posteriormente, utilizando a experiência com as condições mais adequadas do parâmetro anterior, realizaram-se mais dois testes, onde se fez variar o excesso de ar na fornalha. Seguiram-se dois ensaios onde se variaram os ciclos de trabalho das grelhas, comparando os resultados com o ponto mais adequado obtido da conjugação dos dois parâmetros anteriormente mencionados. Analisados os parâmetros enunciados, conclui-se:

- A diminuição do caudal de ar primário na segunda secção da grelha e o aumento na terceira parecem fomentar a emissão de CO. A produção adicional de NO pode estar associada a uma estequiometria do primeiro estágio muito elevada e do possível arrastamento de material combustível da grelha para o segundo estágio, por ação da movimentação das grelhas e excesso de escoamento de ar primário;
- Verifica-se que há uma disparidade entre os valores teóricos e observados experimentalmente para as razões de excesso de ar, o que implica um ajuste do sistema de controlo e operação da caldeira;
- A movimentação das grelhas influencia a combustão, favorecendo ou limitando a extensão da reação global do processo em causa. Através dos resultados obtidos, é possível concluir-se que a alteração da movimentação das grelhas tem impacto ao nível da emissão de compostos inqueimados. Por outro lado, este parâmetro não afeta as restantes variáveis monitorizadas, nomeadamente a emissão de NO.

Keywords

Biomass, combustion, fixed bed, furnace, reciprocating grate, monitoring, primary air, excess air, grate movement

abstract

Used for thousands of years in an energetic context, the process of thermo-chemical conversion – combustion – applied to biomass entitles several advantages, namely the energy use through a renewable and CO₂-neutral resource. However, there are inconveniences, specifically the emission of pollutants dangerous for both the environment and the human being. Therefore, the objective of this work was the monitoring of the operational conditions of a combustion process, in such a way that parameter values can be obtained that, for the tested environments, minimize the process impact, whilst maximizing the system's efficiency.

For the present work, the combustion of wood pellets was conducted in a medium power (581kW_{th}) fixed-bed boiler which integrates an Archimedes-screw feeding system, a furnace with reciprocating grate and two heat exchangers (one horizontal, one vertical) for the water heating process. The system includes also a multicyclone for the dust removal of the gaseous effluent and an extraction fan for flushing the gases out the chimney.

Three separate parameters were analyzed: primary air distribution in the furnace, air excess and grate movement. The experimental procedure was done through the variation of the percentage of primary air in all the grate sections, fixating the work-cycles thereof, to find out the appropriate conditions of the system. Afterwards, for that point, two rehearsals were conducted, by varying the air excess in the furnace. Finally, two more experiments were conducted, varying the grates' work-cycles, comparing the obtained results with those of the point most appropriate conditions. By analysis of the results, it can be concluded that:

- The reduction of primary air flow in the second section and the increase in the third section can boost CO production. The additional production of NO may be associated with too much air in the very first stage and the possible entrainment of fuel material from the grate to the second stage, due to the movement of the grate and the excess of primary air flow;
- There is a disparity between the theoretical and actual values for the excess air ratios, which implies an adjustment of the boiler control system;
- The grate movement influences the combustion, favoring or limiting the extent of the overall reaction of the process in question. By means of the obtained results, it is possible to conclude that the change in the grate movement has an impact on the emission of unburnt compounds. On the other hand, this parameter does not affect the remaining variables monitored, namely the NO emissions.

Índice

Índice.....	i
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	v
Lista de abreviaturas	vii
Nomenclatura	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema e Motivação.....	1
1.2 Objetivos do Estágio.....	1
1.3 Empresa Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda.	3
1.4 Organização do Relatório de Estágio.....	3
2 Biomassa e Bioenergia	5
2.1 Importância da biomassa no contexto energético	6
2.2 Caracterização de um biocombustível sólido	7
3 Conversão energética de biomassa	11
3.1 Combustão	11
3.1.1 Otimização do processo de combustão.....	13
3.1.2 Tecnologias de combustão	16
3.1.3 Impacto ambiental	19
4 Descrição do caso de estudo.....	27
4.1 Caldeira.....	27
4.1.1 Fornalha com sistema de grelhas móveis	28
4.1.2 Permutador Horizontal	29
4.1.3 Permutador Vertical.....	29
4.2 Equipamento auxiliar.....	31
4.2.1 Alimentação de Biomassa	31
4.2.2 Ignição	32
4.2.3 Sistema de Introdução de Ar	33
4.2.4 Sistema de Tratamento do Efluente Gasoso	34
4.2.5 Extração dos Gases de Combustão.....	35
4.2.6 Sistemas de Monitorização e Controlo.....	36
5 Análise de parâmetros da caldeira.....	43
5.1 Parâmetros	43
5.1.1 Distribuição de Ar primário.....	43

5.1.2	Excesso de Ar	56
5.1.3	Movimentação das grelhas	61
5.2	Comportamento da caldeira	65
5.2.1	Perfil da Composição do Efluente Gasoso ao longo do tempo.....	66
5.2.2	Perfil de Temperatura	67
5.2.3	Alimentação, introdução de ar e Oxigénio	69
5.2.4	Perfil da depressão na fornalha.....	70
5.2.5	Perfil da potência térmica do sistema de combustão	71
6	Conclusões gerais e sugestões	73
6.1	Conclusões Gerais.....	73
6.2	Sugestões e recomendações	74
	Referências	77

Lista de Figuras

Figura 2.1. Biomassa no contexto da bioenergia.....	7
Figura 3.1. Percurso de uma partícula de combustível no processo de combustão.....	13
Figura 3.2. Diagrama de controlo de uma caldeira a pellets para a regulação do ar de combustão.	14
Figura 3.3. Tecnologia de combustão em leito fixo.	16
Figura 3.4. Grelha reciprocating.	17
Figura 3.5. Esquema da caldeira com grelha reciprocating.....	18
Figura 3.6. Esquema do progresso da combustão no leito da fornalha.	19
Figura 3.7. Influência da temperatura na formação de CO em processos de combustão.	21
Figura 3.8. Mecanismo de formação de Fuel-NO.	23
Figura 4.1. Caldeira Ventil-Engenharia do Ambiente.....	27
Figura 4.2. Sem-fim de alimentação à fornalha (à esquerda) e pellets de madeira (à direita).	31
Figura 4.3. Equipamento de ignição acoplado à fornalha.	32
Figura 4.4. Esquema da introdução de ar primário na fornalha.	33
Figura 4.5. Ventilador de introdução de ar primário (à esquerda) e de ar secundário/terciário (à direita).	34
Figura 4.6. Multiciclone.	34
Figura 4.7. Ventilador de extração dos gases de exaustão.	36
Figura 4.8. Quadro elétrico da caldeira.	36
Figura 4.9. Sonda lambda para medição do teor de oxigénio húmido no efluente gasoso.....	37
Figura 4.10. Termopar tipo N.....	37
Figura 4.11. Transmissor de pressão diferencial Jumo Instrument Co. Ltd (à esquerda) e o transmissor de pressão diferencial Testo 512 (à direita).....	38
Figura 4.12. Tubo de Pitot.....	38
Figura 4.13. Transmissor de pressão diferencial da Kimo Instruments.	40
Figura 4.14. Sonda de amostragem de gases.....	40
Figura 4.15. Condicionador de gases (à esquerda) e analisador de gases (à direita).....	40
Figura 4.16. Transmissor VAISALA HUMICAP®, modelo HMT310 (à esquerda) com sensor HMT315 (à direita).	41
Figura 4.17. Medidor de caudal de água: Sonometers™ 1100 Danfoss.	42
Figura 5.1. Esquema de montagem dos equipamentos de medição.	45
Figura 5.2. Distribuição de pellets de madeira no leito de combustão (grelhas reciprocating).....	47
Figura 5.3. Curva de calibração do sem-fim de alimentação.	50

Figura 5.4. Emissões de CO e NO para os ensaios A, B e C, em função do teor de O ₂ seco medido no efluente gasoso.	52
Figura 5.5. Razão de excesso de ar total e estequiometria do primeiro estágio obtidas para os ensaios A, B e C, em função do teor de O ₂ seco no efluente gasoso.	52
Figura 5.6. Caudal mássico de ar primário nas três secções, para os ensaios A, B e C.	53
Figura 5.7. Temperaturas médias dos gases de combustão monitorizadas em diferentes localizações, durante as experiências A, B e C.	54
Figura 5.8. Caudais médios mássicos de ar de combustão e de combustível, para os ensaios A, B e C.	54
Figura 5.9. Emissões de CO e NO para os ensaios 1, 2 e 3 em função do teor de O ₂ seco medido no efluente gasoso.	57
Figura 5.10. Razão de excesso de ar total e estequiometria do primeiro estágio obtidas para os ensaios 1, 2 e 3, em função do teor de O ₂ seco no efluente gasoso.	58
Figura 5.11. Temperaturas médias medidas nos ensaios 1, 2 e 3.	59
Figura 5.12. Caudais médios de ar de combustão e de combustível, para os ensaios 1, 2 e 3.	59
Figura 5.13. Emissões de CO e NO para os ensaios I, II e III em função do teor de O ₂ seco medido no efluente gasoso.	63
Figura 5.14. Razão de excesso de ar total e estequiometria do primeiro estágio obtidas para os ensaios I, II e III, em função do teor de O ₂ seco no efluente gasoso.	63
Figura 5.15. Temperaturas médias dos gases de combustão para os ensaios I, II e III.	64
Figura 5.16. Caudais médios de ar de combustão e de combustível, para os ensaios I, II e III.	64
Figura 5.17. Perfil de CO, CO ₂ e O ₂ , em função do tempo, para o ensaio com as condições de operação mais adequadas.	66
Figura 5.18. Perfil de NO e O ₂ , em função do tempo, para o ensaio com as condições de operação mais adequadas.	67
Figura 5.19. Perfil de temperatura na caldeira.	68
Figura 5.20. Perfil de temperatura na água.	68
Figura 5.21. Relação entre o teor de oxigénio húmido medido pela sonda lambda e a frequência de funcionamento do moto-redutor do sem-fim de alimentação, em função do tempo.	69
Figura 5.22. Relação entre o teor de Oxigénio húmido medido pela sonda lambda e a frequência de funcionamento do moto-redutor do ventilador de introdução de ar, em função do tempo.	70
Figura 5.23. Depressão na fornalha.	70
Figura 5.24. Potência do sistema.	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Intervalos de valores para biomassa - análise elementar.....	9
Tabela 2.2. Intervalos de valores para biomassa - análise imediata.....	10
Tabela 3.1. Características das variáveis fundamentais do processo de combustão.....	12
Tabela 3.2. Fases do processo de combustão.....	12
Tabela 3.3. VLE para fornalhas/caldeiras a biomassa.....	25
Tabela 4.1. Análise imediata de pellets de madeira (% mássica, btq, e PCS e PCI).....	32
Tabela 4.2. Análise elementar de pellets de madeira (em bs).....	32
Tabela 4.3. Dimensões das condutas.....	39
Tabela 4.4. Gama de leitura do analisador para os vários gases.....	41
Tabela 4.5. Coeficientes da regressão linear utilizada para a determinação da pressão de vapor de saturação.....	42
Tabela 5.1. Parametrização do software de controlo da movimentação das grelhas.....	46
Tabela 5.2. Parâmetros operacionais da fornalha/caldeira.....	49
Tabela 5.3. Caracterização dos ensaios escolhidos e parametrização no software da fornalha/caldeira da abertura das válvulas de borboleta para distribuição do ar primário.....	50
Tabela 5.4. Caudal volumétrico de ar primário para cada secção, para os ensaios A, B e C.....	53
Tabela 5.5. Composição do efluente gasoso e cumprimento da legislação para os ensaios A, B e C:.....	55
Tabela 5.6. Variação de O ₂ no efluente gasoso.....	56
Tabela 5.7. Razão de excesso de ar (teórica e observada experimentalmente) para os ensaios 1, 2, e 3.....	58
Tabela 5.8. Caudal volumétrico total do ar de combustão de cada ensaio 1, 2 e 3.....	60
Tabela 5.9. Composição do efluente gasoso e cumprimento da legislação para os ensaios 1, 2 e 3:.....	60
Tabela 5.10. Ciclo de trabalho [s] para os ensaios (I), (II) e (III).....	61
Tabela 5.11. Tempo de repouso das grelhas [s] para os ensaios (I), (II) e (III).....	63
Tabela 5.12. Composição do efluente gasoso e cumprimento da legislação para os ensaios I, II e III:.....	65
Tabela 5.13. Valores médios de temperatura nos vários pontos de amostragem.....	68
Tabela 5.14. Temperatura média da água.....	68
Tabela 5.15. Valores médios para os caudais de biomassa e de ar de combustão.....	69

Lista de abreviaturas

bs	- Base seca
bssc	- Base seca sem cinzas
btq	- Base tal e qual
CF	- Carbono Fixo
GEE	- Gases com Efeito de Estufa
HMI	- <i>Human Machine Interface</i>
I&DT	- Investigação e Desenvolvimento Tecnológico
IPVC	- Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Lda	- Limitada
MV	- Matéria Volátil
MIEA	- Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente
PAH	- Hidrocarboneto Aromático Policíclico (<i>Polycyclic aromatic hydrocarbon</i>)
PM	- <i>Particulate Matter</i> (Material Particulado)
PTN	- Condições de Pressão e Temperatura Normais [$P_N = 101,3 \text{ kPa}$ e $T_N = 273 \text{ K}$]
UA	- Universidade de Aveiro
UE	- União Europeia
VLE	- Valor Limite de Emissão

Nomenclatura

A	- Área da secção da conduta da chaminé para saída dos gases	$[m^2]$
$A_{v,1^{\circ},s}$	- Abertura da Válvula de Borboleta da secção s	$[\%]$
B	- Biomassa em base tal e qual	$[-]$
C	- Carbono	$[-]$
Cl	- Cloro	$[-]$
$c_{p,H_2O,liq}$	- Calor específico médio da água líquida	$[J \cdot kg^{-1} H_2O \cdot K^{-1}]$
C_xH_y	- Hidrocarboneto	$[-]$
CH_4	- Metano	$[-]$
CO	- Monóxido de Carbono	$[-]$
CO_2	- Dióxido de Carbono	$[-]$
fM_{s-f}	- Frequência do moto-redutor do sem-fim de alimentação	$[\%]$
$fM_{s-f, max}$	- Frequência máxima do moto-redutor do sem-fim de alimentação	$[\%]$
$fM_{s-f, min}$	- Frequência mínima do moto-redutor do sem-fim de alimentação	$[\%]$
$fV_{e,max}$	- Frequência máxima do ventilador de exaustão	$[\%]$
$fV_{e,min}$	- Frequência mínima do ventilador de exaustão	$[\%]$
fV_i	- Frequência do ventilador de introdução de ar	$[\%]$
$fV_{i-p, max}$	- Frequência máxima do ventilador de introdução de ar primário	$[\%]$
$fV_{i-p, min}$	- Frequência mínima do ventilador de introdução de ar primário	$[\%]$
$fV_{i-s, max}$	- Frequência máxima do ventilador de introdução de ar secundário	$[\%]$
$fV_{i-s, min}$	- Frequência mínima do ventilador de introdução de ar secundário	$[\%]$
H	- Hidrogénio atómico	$[-]$
H_2	- Hidrogénio molecular	$[-]$
HCN	- Composto de Ciano	$[-]$
k_p	- Fator de correção do tubo de <i>Pitot</i>	$[-]$
$\dot{m}_{biomassa}$	- Caudal mássico de biomassa	$[kg B \cdot h^{-1}]$
N	- Azoto atómico	$[-]$
N_2	- Azoto molecular	$[-]$
NO	- Monóxido de Azoto	$[-]$
NO_2	- Dióxido de Azoto	$[-]$
NO_x	- Óxidos de Azoto	$[-]$
O	- Oxigénio atómico	$[-]$
O_2	- Oxigénio molecular	$[-]$
PCI	- Poder Calorífico Inferior	$[J \cdot kg^{-1} R]$
PCS	- Poder Calorífico Superior	$[J \cdot kg^{-1} R]$
$p_{vs} (@T_U)$	- Pressão de vapor de saturação a T_U	$[bar \text{ ou } Pa]$
Δp	- Diferença entre a pressão total e a pressão estática	$[Pa]$
$\Delta P_{caldeira}$	- Depressão da caldeira	$[mbar]$

$\dot{Q}_{\text{água}}$	- Potência calorífica na água	[kJ·s ⁻¹ ou kW]
R	- Biomassa em base seca	[-]
S	- Enxofre	[-]
SO ₂	- Dióxido de Enxofre	[-]
T _{H₂O,out}	- Temperatura da água de saída	[°C]
T _U	- Temperatura do efluente gasoso	[°C]
U _W	- Humidade relativa no efluente gasoso	[% ou -]
w _{jR}	- Fração mássica de j em base seca	[kg j·kg ⁻¹ R]
W _{WR}	- Razão mássica de água na biomassa em base seca	[kg H ₂ O·kg ⁻¹ R]
v	- Velocidade de escoamento	[m·s ⁻¹]
$\dot{V}_{\text{água}}$	- Caudal volumétrico de água aquecida	[m ³ ·s ⁻¹]
$\dot{V}_{\text{escoamento}}$	- Caudal volumétrico de escoamento	[m ³ ·s ⁻¹]
Y _{O₂, min}	- Teor mínimo de oxigénio húmido no efluente gasoso	[% volúmica]
Y _{O₂, desejado}	- Teor desejado de oxigénio húmido no efluente gasoso	[% volúmica]
y _v	- Fração molar de vapor no efluente gasoso	[kmol H ₂ O·kmol ⁻¹]
Z	- Cinza	[-]

Subscritos

j	- Elemento constituinte da biomassa (j=C, H, O, N, S)	[-]
s	- Secção de introdução de ar primário (s=1, 2, 3)	[-]
th	- <i>termal</i>	[-]

Letras gregas

λ	- Razão de excesso de ar	[-]
$\rho_{\text{água}}$	- Massa volúmica da água	[kg·m ⁻³]
ρ_{biomassa}	- Massa volúmica da biomassa	[kg·m ⁻³]
ρ_G	- Massa volúmica do fluído gasoso	[kg·m ⁻³].

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo faz um breve enquadramento do tema, apresentando a motivação para o desenvolvimento do estudo. Posteriormente, expõe os objetivos a serem cumpridos durante o Estágio na Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda e a respetiva apresentação da empresa. Termina com a estrutura do Relatório de Estágio.

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA E MOTIVAÇÃO

A biomassa, como fonte de energia renovável, assume um papel digno de notoriedade no que diz respeito ao aproveitamento energético. Com efeito, a procura de soluções de produção de energia térmica, a partir da combustão de biomassa, tem conhecido um aumento a nível global.

As empresas fabricantes de fornalhas/caldeiras a biomassa, dedicadas à produção de água quente, reconhecem a necessidade de desenvolvimento de sistemas industriais que permitam a utilização eficiente de uma variedade de combustíveis derivados de biomassa, garantindo um nível reduzido de emissão de poluentes. Desta forma, a procura crescente e a expansão do mercado de produção de fornalhas/caldeiras conduzem ao desenvolvimento de sistemas que possibilitam a utilização de diferentes tipos de biomassa, de forma eficiente.

Assim, é requerida a melhoria de operação de unidades com novas configurações, incluindo fornalhas com grelhas móveis, que possibilitam a movimentação da biomassa de forma controlada, de modo a assegurar um processo de combustão eficiente e a reduzir os problemas associados com a acumulação de cinzas na fornalha e a emissões nocivas para a atmosfera.

Para alcançar a sustentabilidade no âmbito do desempenho energético e ambiental, a operação destes sistemas requer uma monitorização adequada das variáveis de processo com vista a desenvolver estratégias de operação otimizadas.

1.2 OBJETIVOS DO ESTÁGIO

A Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda. é um importante fabricante português de fornalhas/caldeiras a biomassa, com várias décadas de experiência neste setor, que produz equipamentos com potências térmicas que podem variar desde 350 kW_{th} até 7 MW_{th}.

A Universidade de Aveiro (UA) e a Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. têm vindo a desenvolver uma parceria que tem como finalidade permitir a integração de alunos em contexto industrial, com o

intuito de fomentar a sua aprendizagem, promovendo assim a sua formação em contexto de trabalho. Desta união nasceu a possibilidade de realização de um Estágio Curricular, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente (MIEA).

Em junho de 2015, a Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda, em parceria com a UA e o Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) iniciou o “Projeto *Plug & Heat* – Sistema compacto de média potência para a produção de energia térmica a partir de biomassa” que se insere na modalidade “Projetos em Co-Promoção” inscrita na tipologia “I&DT empresas” (Investigação e Desenvolvimento Tecnológico). Este projeto surgiu do desejo de desenvolvimento de uma solução inovadora relacionada com a aplicação de biomassa em processos de conversão termoquímicos. Deste projeto resultou a caldeira *Plug & Heat*, sistema de leito fixo com grelhas móveis (*reciprocating*), onde vai ser desenvolvido o trabalho subjacente ao Estágio.

O Estágio pretende contribuir para a formação de recursos humanos através da aquisição de competências no domínio da combustão de biomassa em fornalhas/caldeiras industriais para produção de energia térmica. Desta forma, pretendem-se alcançar os seguintes objetivos:

- Compreender o funcionamento de um sistema de combustão em leito fixo com grelha móvel;
- Discutir a influência das diversas variáveis do processo de combustão no desempenho ambiental e energético, nomeadamente:
 - ❖ Distribuição de ar primário;
 - ❖ Excesso de ar.
 - ❖ Movimentação das grelhas.

O Estágio pressupõe um plano de trabalho que reúne as seguintes tarefas:

1. Pesquisa de informação sobre combustão de biomassa em fornalhas/caldeiras industriais;
2. Caracterização dum protótipo de demonstração industrial com fornalha/caldeira para combustão de biomassa em grelha móvel e respetivos sistemas auxiliares fabricados pela Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda;
3. Colaboração no desenvolvimento e implementação de uma metodologia para monitorização e caracterização das condições de operação da fornalha/caldeira de demonstração industrial na Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda;
4. Colaboração na definição de condições adequadas de operação da fornalha/caldeira com base nos resultados experimentais obtidos;
5. Organização e escrita do relatório de Estágio.

1.3 EMPRESA VENTIL-ENGENHARIA DO AMBIENTE, LDA.

A Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda, unidade industrial do setor metalomecânico, foi fundada em 1971, dedicando-se inicialmente (Ventil, 2016):

- Ao desenvolvimento, construção e instalação de sistemas de proteção ambiental, como ciclones/multiciclones e filtros de mangas (sistemas de despoeiramento de efluentes gasosos);
- Ao fabrico de outros equipamentos mecânicos, nomeadamente silos metálicos, ventiladores, tubagens metálicas, válvulas rotativas e transportadores sem-fim.

Posteriormente, a empresa decidiu apostar na produção de energia a partir de biomassa construindo e utilizando caldeiras/fornalhas para aquecimento de água. A energia térmica produzida pode abastecer diversos setores: os serviços municipais, habitações (redes de calor), floricultura, avicultura, suinicultura, setor industrial, setor hoteleiro, entre outros (Ventil, 2016). O trabalho a desenvolver durante o Estágio foca-se na monitorização das condições de operação de uma fornalha com grelha móvel para combustão de biomassa.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO DE ESTÁGIO

O presente Relatório de Estágio é constituído por 6 capítulos, nomeadamente:

- **Capítulo 1. Introdução:** Apresentação do Enquadramento do tema e Motivação, objetivos do Estágio, apresentação da empresa onde será realizado o Estágio Curricular e organização do Relatório de Estágio;
- **Capítulo 2. Biomassa e Bioenergia:** Exposição das principais características relativamente ao conceito de biomassa e bioenergia, apresentando a importância do biocombustível face ao aproveitamento energético e as características físicas e químicas da biomassa;
- **Capítulo 3. Conversão energética de biomassa:** Breve introdução teórica sobre os diversos processos de conversão termoquímica, dando particular atenção ao processo de combustão e otimização do mesmo. Serão ainda enunciadas as diferentes tecnologias associadas ao processo de combustão, apresentando a fornalha com grelha móvel do tipo *reciprocating*. O capítulo termina com uma pequena revisão de literatura relativa ao impacto ambiental relacionado com o processo de combustão e com a apresentação da legislação nacional aplicada a sistemas de combustão;

- **Capítulo 4. Descrição do caso de estudo:** Descrição do caso de estudo presente na empresa, onde são apresentados os vários componentes da caldeira – fornalha, sistema de grelhas móveis, permutador horizontal e permutador vertical. Para além dos equipamentos da caldeira, é exposto todo o material auxiliar, incluindo o equipamento de monitorização das condições de operação;
- **Capítulo 5. Análise de parâmetros:** Exposição da abordagem metodológica adotada e da discussão de resultados/conclusões.
- **Capítulo 6. Conclusões gerais e sugestões:** Apresentação das principais conclusões e sugestões para trabalho futuro.

2 BIOMASSA E BIOENERGIA

Este capítulo sumaria as principais concepções subjacentes ao conceito de biomassa, evidenciando a importância desta no contexto energético e apresentando as diversas propriedades que caracterizam a biomassa como combustível.

O Decreto-Lei nº 39/2013, de 18 de março, transpõe, parcialmente, para o direito interno a Diretiva n.º 2009/28/CE, de 23 de abril, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. No diploma supracitado, apresenta-se a definição de biomassa adotada pela União Europeia (UE): “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura, incluindo substâncias de origem vegetal e animal, da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”.

Por sua vez, a Diretiva (UE) 2015/2193, de 25 de novembro, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à limitação das emissões para a atmosfera de certos poluentes provenientes de médias instalações de combustão, define biomassa como:

- a) “Produtos compostos por uma matéria vegetal agrícola ou silvícola suscetível de ser utilizada como combustível para efeitos de recuperação do seu teor energético;
- b) Tipos de resíduos:
 - i. resíduos vegetais provenientes da agricultura e da silvicultura;
 - ii. resíduos vegetais provenientes da indústria de transformação de produtos alimentares, se o calor gerado em resultado da sua utilização for recuperado;
 - iii. resíduos vegetais fibrosos provenientes da produção de pasta virgem de papel e da produção de papel a partir de pasta, se forem co-incinerados no local de produção e o calor gerado for recuperado;
 - iv. resíduos de cortiça;
 - v. resíduos de madeira, com exceção dos resíduos de madeira que possam conter compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamento com conservantes de madeira ou com revestimento, incluindo, nomeadamente, os resíduos de madeira deste tipo provenientes de resíduos de construção e demolição.”

Neste sentido, a biomassa caracteriza-se como toda a matéria viva, presente na Terra de origem não fóssil, incluindo biomassa vegetal (*phytomass*) e biomassa animal (*zoomass*) (Demirbas, 2005; FAO, 2017; Saidur *et al.*, 2011). Assim, a biomassa, como fonte energia solar armazenada sob forma de

energia química em plantas e animais, é um dos recursos mais versáteis e preciosos presentes na Terra (Demirbas, 2005).

A bioenergia é o termo utilizado para a energia associada a biomassa e o biocombustível é o “portador de bioenergia”. Os biocombustíveis podem ser vistos como fontes renováveis desde que seja considerada uma produção de biomassa sustentável (FAO, 2017; Van Loo & Koppejan, 2008). Desta forma, diferentes tipos de combustíveis derivados de biomassa podem ser destacados (Rosendahl, 2013):

- Biomassa Residual Florestal;
- Biomassa Residual Agrícola;
- Resíduos Sólidos Urbanos;
- Culturas Energéticas.

Contudo, nem todos os tipos de biomassa são adequados para o processo de combustão (Saidur *et al.*, 2011). Após várias investigações feitas nesta área por Dahl & Obernberger (2004), Fournel *et al.* (2015) e Sun *et al.* (2015), é possível concluir-se que a biomassa residual florestal é a mais indicada para o processo de combustão uma vez que, em relação às restantes, apresenta maior poder calorífico e menor teor de humidade e de cinzas (Dahl & Obernberger, 2004; Fournel *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2015).

2.1 IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NO CONTEXTO ENERGÉTICO

O papel da energia é crucial para o presente e futuro do planeta. Atualmente, a biomassa é a quarta potência a nível mundial, como recurso energético, a seguir ao petróleo, gás natural e carvão, preenchendo, aproximadamente, 14 % das necessidades energéticas da Terra (García *et al.*, 2012; World Energy Council, 2016).

De acordo com o Glossário de Estatísticas Ambientais (1997), os recursos renováveis são aqueles que, depois da exploração, podem regressar aos seus níveis de armazenamento iniciais por processos naturais de crescimento ou por reposição. Os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) resultam de matéria orgânica, animal ou vegetal, com milhões de anos (United Nations, 1997). Deste modo, não podem ser considerados recursos renováveis uma vez que não podem ser repostos no tempo de vida do ser humano. Assim, a queima de combustíveis fósseis conduz à emissão de “novo CO₂ (Dióxido de Carbono)” na atmosfera, o que vai contribuir para o Efeito de Estufa e para a depleção de recursos (McKendry, 2002a).

Por outro lado, a biomassa é vista como um recurso renovável uma vez que o *stock* natural tem a capacidade de repor este produto à escala do tempo de vida do ser humano. Observando a Figura 2.1 e assumindo o sistema apresentado como isolado, o biocombustível em questão pode também ser considerado “neutro de CO₂” no que diz respeito ao equilíbrio dos Gases com Efeito de Estufa (GEE), dado que todo o Dióxido de Carbono libertado durante o processo de combustão é absorvido pelas plantas durante o seu crescimento no processo de fotossíntese (Djurović *et al.*, 2012).

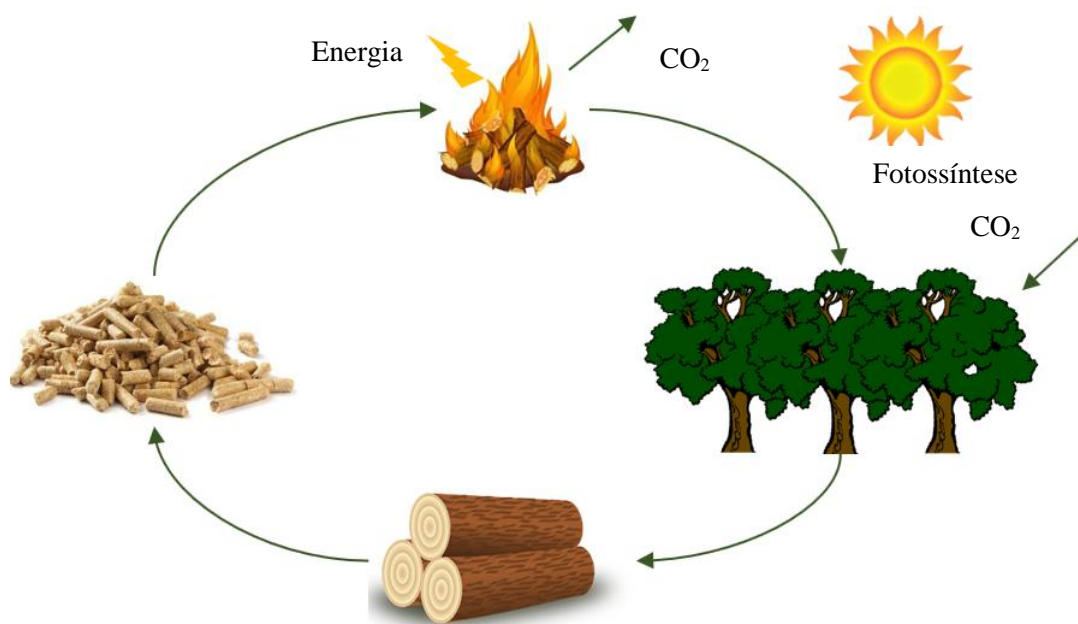


Figura 2.1. Biomassa no contexto da bioenergia.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE UM BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO

A biomassa é constituída, essencialmente, por água, cinzas e matéria seca sem cinzas, sendo este último o componente de interesse para a conversão energética, contendo poder calorífico (Dahlquist, 2013). Sob o ponto de vista bioquímico, o biocombustível em questão integra diversos constituintes, nomeadamente: celulose, hemicelulose, lenhina, lípidos, açúcares simples, amidos, hidrocarbonetos, entre outros (Jenkins *et al.*, 1998).

O processo de combustão de biomassa acarreta problemas relacionados com as características físicas e químicas do biocombustível (Kraszkiewicz *et al.*, 2015). Desta forma, as propriedades do combustível são a base para a escolha apropriada de uma tecnologia para a obtenção de energia. Dependendo destas propriedades, um combustível derivado de biomassa pode ser excluído como opção deste processo por razões técnicas ou ambientais. As características da biomassa são

influenciadas pela origem da biomassa, resultando numa ampla variedade de propriedades de combustível, nomeadamente (García *et al.*, 2012):

- Massa volúmica aparente;
- Poder calorífico;
- Análise elementar;
- Análise imediata:
 - ❖ Teor em Matéria Volátil (MV);
 - ❖ Teor em Carbono Fixo (CF);
 - ❖ Teor de Humidade;
 - ❖ Teor de Cinzas.

A **massa volúmica aparente** é uma propriedade física, sendo definida como a massa de biomassa por unidade de volume da mesma. Importante para duas atividades: transporte e armazenamento. Assim, quanto mais elevado for o valor da massa volúmica aparente, maior será a quantidade de massa de biomassa que pode ser transportada/armazenada por unidade de volume, minimizando, portanto, os custos das atividades indicadas (Carroll & Finnan, 2012).

O **poder calorífico** de um combustível representa o conteúdo energético libertado durante a combustão de um combustível e pode ser medido em termos de energia, por unidade de massa ou por unidade de volume, caso se trate de material sólido ou líquido/gasoso, respetivamente (McKendry, 2002a). Esta propriedade pode ser expressa de duas formas distintas: Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS) (Carroll & Finnan, 2012).

O PCS pode ser definido como a energia libertada durante o processo de combustão (PCI), considerando que a água nos produtos de combustão está no estado líquido (Tarelho, 2016; Van Den Broek *et al.*, 1996). Com efeito, o poder calorífico de biomassa é uma indicação da energia quimicamente ligada ao biocombustível em análise, podendo ser determinado de forma experimental, recorrendo a instrumentação especial, ou calculado através dos resultados das análises imediata e/ou elementar (Erol *et al.*, 2010).

A **análise elementar** é um dos fatores mais importantes no estudo das propriedades dos combustíveis derivados de biomassa. Permite conhecer as percentagens de Azoto (N), Enxofre (S) e Cloro (Cl), com o intuito de avaliar o impacto ambiental associado à utilização de um dado tipo de biomassa. Possibilita ainda o cálculo das percentagens de Carbono (C), Hidrogénio (H) e Oxigénio (O), por

forma a estimar as necessidades estequiométricas de ar e o poder calorífico dos combustíveis (Saidur *et al.*, 2011).

O Carbono, Hidrogénio e Oxigénio são os principais componentes dos biocombustíveis sólidos. O Carbono e o Hidrogénio são oxidados durante a combustão por reações exotérmicas, formando Dióxido de Carbono e água, respetivamente. O conteúdo destes elementos potencia o aumento do poder calorífico superior, ao passo que a presença de Oxigénio no combustível inibe o incremento da mesma propriedade (García *et al.*, 2014a; Obernberger *et al.*, 2006). A Tabela 2.1 apresenta os resultados de um estudo realizado por Vassilev *et al.* (2010) relativamente à análise elementar de diversos tipos de biomassa.

Tabela 2.1. Intervalos de valores para biomassa - análise elementar.

Análise elementar [% mássica]					
Carbono (bssc)	Oxigénio (bssc)	Hidrogénio (bssc)	Azoto (bssc)	Enxofre (bssc)	Cloro (bs)
42-71	16-49	3-11	0,1-12	0,01-2,3	0,01-0,9

Fonte: Vassilev *et al.* (2010)

A **análise imediata** possibilita a determinação da percentagem relativa ao conteúdo em Matéria Volátil (MV) e Carbono Fixo (CF), bem com o Teor de Humidade e de Cinzas (Dahlquist, 2013). Estas propriedades são muito importantes para o estudo do processo de combustão, estando os teores de Carbono Fixo e Matéria Volátil relacionados diretamente com o aumento do poder calorífico de qualquer combustível derivado de biomassa (Saidur *et al.*, 2011).

O **teor em Matéria Volátil** (MV) de um combustível corresponde à parcela removida como gás (exceto a humidade), por aquecimento, na ausência de ar (García *et al.*, 2014b). É considerada uma característica de elevada importância, uma vez que permite estimar a quantidade de ar secundário a fornecer à câmara de combustão (Dahlquist, 2013). Este parâmetro influencia a decomposição térmica do combustível e o *design* da instalação de combustão. Teores elevados de voláteis facilitam a ignição a temperaturas baixas, o que implica uma elevada reatividade, enriquecendo o processo de combustão (García *et al.*, 2014b).

O **Carbono Fixo** (CF) ou não combinado de um combustível é a fração remanescente depois do teor em Matéria Volátil ser completamente libertado, excluindo o teor em cinzas e o conteúdo em humidade. A razão entre MV e CF aumenta o grau de reatividade da biomassa. Quanto maior este fator, mais fácil é a ignição e menor o estágio de residência até a combustão estar completa (García *et al.*, 2014b).

A biomassa é, por natureza, higroscópica, sendo o **teor de humidade** um parâmetro de extrema importância para o processo de combustão (Carroll & Finnan, 2012; Hermansson *et al.*, 2011). O conteúdo em água influencia o comportamento do processo de combustão, a temperatura de

combustão adiabática, o volume de gases de exaustão produzidos por unidade de energia e a energia a despendar para evaporar a água. Combustíveis derivados de biomassa húmidos necessitam de um tempo de residência elevado para a secagem, o que requer câmaras de combustão de maiores dimensões para prevenir emissões resultantes de uma combustão incompleta (Oberberger, 1998; Van Loo & Koppejan, 2008). Desta forma, o teor de humidade desvaloriza o interesse comercial da biomassa, uma vez que diminui o conteúdo energético deste biocombustível, absorvendo energia durante o processo de combustão para evaporação da água (Dahlquist, 2013).

A decomposição química de um combustível de biomassa, por processos termoquímicos ou bioquímicos, produz um resíduo sólido. Quando produzido por combustão, este resíduo sólido é denominado "cinza" (componente inorgânica), traduzindo-se num parâmetro de medição padrão para combustíveis sólidos. O **teor de cinzas** da biomassa afeta tanto os custos associados à manipulação como os de processamento do biocombustível, influenciando, portanto, o custo global de conversão de energia de biomassa (McKendry, 2002a).

O teor em cinzas depende das espécies e componentes das plantas utilizadas como biomassa. A disponibilidade de nutrientes, a qualidade do solo, os fertilizantes e as condições meteorológicas têm influência no teor e composição das cinzas (Saidur *et al.*, 2011). Desta forma, o teor de cinzas diminui o interesse comercial da biomassa, uma vez que estas (Dahlquist, 2013; McKendry, 2002a):

- Diminuem o conteúdo energético da biomassa;
- Necessitam de ser eliminadas, normalmente em aterro, sendo esta opção indesejada de ponto de vista ambiental e económico;
- As cinzas volantes são transportadas nos gases de exaustão, exigindo um tratamento do efluente gasoso para evitar a emissão de material particulado para a atmosfera;
- As cinzas volantes ficam depositadas nas paredes nos permutadores de calor (fenómeno de *fouling*).
- Podem provocar o fenómeno de *slagging* – formação de uma escória (fração vítrea da cinza de fundo) em fase líquida produzida a temperaturas elevadas – o que pode levar a uma redução do rendimento do sistema, resultando em custos operacionais acrescidos.

A Tabela 2.2 apresenta os resultados de um estudo realizado por Vassilev *et al.* (2010) relativamente à análise imediata de diversos tipos de biomassa.

Tabela 2.2. Intervalos de valores para biomassa - análise imediata.

Análise imediata [% mássica] (btq)			
Matéria Volátil	Carbono Fixo	Humidade	Cinzas
48-86	1-38	3-63	0,1-46

Fonte: Vassilev *et al.* (2010)

3 CONVERSÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA

Este capítulo apresenta os diferentes processos de conversão energética, nomeadamente a combustão, apresentando mecanismos de otimização do mesmo. Identifica as diversas tecnologias de combustão, dando particular ênfase ao sistema de combustão com grelha móvel *reciprocating* (caso de estudo). O capítulo termina abordando o impacto ambiental associado ao processo de combustão, focando-se na formação de Monóxido de Carbono e de Monóxido de Azoto, e no enquadramento legal em matéria de poluição atmosférica.

A biomassa apresenta um potencial interessante como energia renovável para produção de diferentes formas de energia, podendo ser convertida para usufruto do seu teor energético através de diversos processos para a transformação da biomassa em combustível (Yılmaz & Selim, 2013). A escolha do processo a utilizar depende de vários fatores: tipo e quantidade de biomassa disponível, a forma de energia desejada, requisitos para utilização final, padrões ambientais, condições económicas, entre outros (McKendry, 2002b). Os processos podem ser agrupados em três categorias (Saidur *et al.*, 2011):

- **Termoquímica** – a combustão, a pirólise e a gasificação são usadas para recuperar a energia química armazenada na biomassa;
- **Bioquímica** – recorre a microrganismos durante a fermentação alcoólica e a digestão anaeróbia para a conversão da energia da biomassa, por exemplo em biogás;
- **Química** – está associado processos físico-químicos (esterificação) para conversão da energia quimicamente ligada ao biocombustível.

3.1 COMBUSTÃO

O processo de combustão é um conjunto de fenómenos complexos que envolvem simultaneamente transferência de massa e de calor, acompanhada de reações químicas e de fluxo de um fluido (Saidur *et al.*, 2011). A combustão pode ser definida por uma série de reações químicas que se traduzem na dissociação da biomassa (na presença de um comburente) em Dióxido de Carbono e água. São necessários três fatores (3T's), para que a reação global de combustão seja completa – Tabela 3.1 (García *et al.*, 2012; Tarelho, 2016):

Temperatura elevada – afeta a cinética da reação, uma vez que as constantes de velocidade aumentam exponencialmente com a temperatura – Lei de *Arrhenius*.

Turbulência suficiente da mistura de comburente-combustível – essencial para assegurar uma mistura efetiva do comburente com o combustível, por forma a garantir uma boa distribuição da temperatura e dos radicais que são produzidos e necessários para o desenvolvimento da reação.

Tempo de Residência elevado – o aumento do tempo de residência a que os reagentes são submetidos permite aumentar o grau de conversão destes em produtos.

Tabela 3.1. Características das variáveis fundamentais do processo de combustão.

Variáveis fundamentais	Características	Fonte
Temperatura	Elevada – Superior a 800 °C na câmara de combustão	Nussbaumer (2003)
Turbulência	Elevada por forma a garantir uma mistura eficiente do comburente/combustível	Quaak <i>et al.</i> (1999)
Tempo de Residência	Elevado – Superior a 1,5 segundos, dependendo da biomassa	Obernberger <i>et al.</i> (2006)

Se as condições necessárias não estiverem presentes, dar-se-á uma reação incompleta, gerando um subproduto primário, o Monóxido de Carbono (CO), sendo este o primeiro indicativo de mau funcionamento do processo, podendo ser visto como um indicador de não eficiência (García *et al.*, 2012).

A combustão de biomassa é um processo complexo que consiste em reações, heterogéneas e homogéneas, apresentando quatro fases distintas: Aquecimento e secagem, desvolatilização, oxidação de voláteis e combustão de *char* (carbonizado) (Dahlquist, 2013; Obernberger *et al.*, 2006). A Tabela 3.2 apresenta uma breve descrição das diferentes etapas do processo de combustão.

Tabela 3.2. Fases do processo de combustão.

Fase	Descrição	Fonte
Aquecimento e secagem	Evaporação da humidade presente no biocombustível, por forma a melhorar a eficiência dos estágios seguintes, ocorrendo, aproximadamente, à temperatura de 105 °C.	Quaak <i>et al.</i> (1999) García <i>et al.</i> (2012) Coelho & Costa (2012)
Desvolatilização	Corresponde à etapa onde ocorre a degradação térmica do combustível na ausência de oxigénio, de onde resultam voláteis e carbonizado. Ocorre entre 200 – 260 °C para diferentes tipos de biomassa.	Quaak <i>et al.</i> (1999) Obernberger <i>et al.</i> (2006) Coelho & Costa (2012)
Oxidação de voláteis	Combustão dos gases que resultam da fase de desvolatilização.	Quaak <i>et al.</i> (1999)
Combustão do <i>char</i>	Oxidação da matriz carbonácea resultante do processo de desvolatilização.	Quaak <i>et al.</i> (1999) García <i>et al.</i> (2012)

A secagem e desvolatilização serão sempre as primeiras fases no processo de combustão de um combustível sólido. A importância relativa destas etapas vai variar, dependendo da tecnologia de

combustão implementada, das propriedades do combustível utilizado e das condições do processo de combustão (Van Loo & Koppejan, 2008).

Como referido anteriormente (Secção 2.2), o teor de humidade é um fator limitativo do processo de combustão de biomassa devido ao seu efeito no poder calorífico. A reação de combustão é exotérmica, ao passo que a evaporação da água se traduz numa reação endotérmica. A combustão é autossuficiente do ponto de vista energético se o teor de humidade dos combustíveis derivados de biomassa for inferior a 65% (em base tal e qual). Acima deste valor, não é libertada energia suficiente na combustão para satisfazer a evaporação e o aquecimento do produto (Jenkins *et al.*, 1998).

Uma vez evaporada toda a humidade presente no combustível, inicia-se o processo de desvolatilização, no qual são libertados produtos gasosos, denominados voláteis, formando-se um resíduo rico em Carbono, *char*. Os produtos da desvolatilização que entram em contacto com o Oxigénio, sofrerão dois tipos de combustão: oxidação de voláteis e oxidação do *char*. A combustão dos voláteis consiste numa reação homogénea relativamente rápida, em comparação com a oxidação do resíduo carbonoso, que se traduz numa reação heterogénea lenta (Dahlquist, 2013).

O tempo usado para cada fase depende das dimensões e propriedades do combustível, da temperatura e das condições de combustão (Nussbaumer, 2003). Com o intuito de visualizar cada fase do processo, a Figura 3.1 apresenta o percurso de uma partícula de combustível durante a combustão.

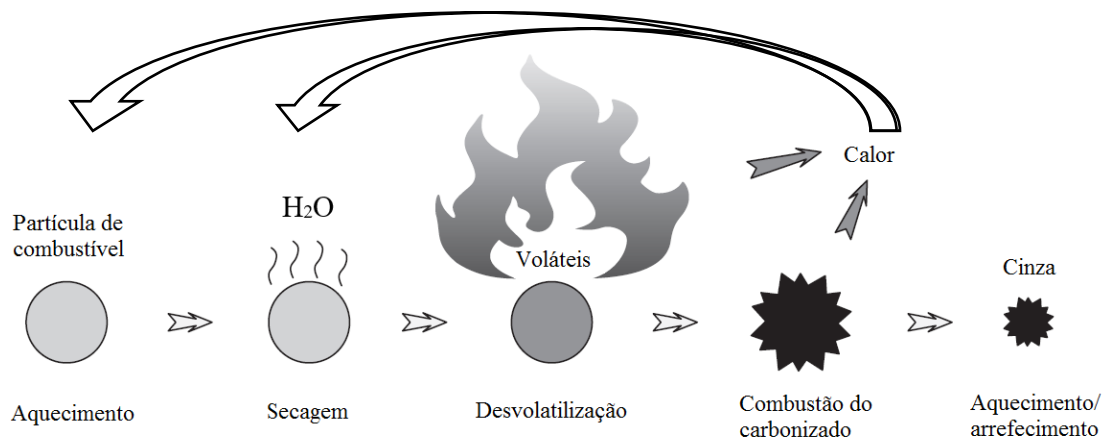


Figura 3.1. Percurso de uma partícula de combustível no processo de combustão.

Fonte: Adaptado de Rosendahl (2013).

3.1.1 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO

De acordo com Van Loo & Koppejan (2008), o processo de combustão pode ser melhorado tendo em vista a redução das emissões de poluentes e a maximização da eficiência energética do sistema através de diversas variáveis, nomeadamente:

- Razão de excesso de ar;
- Introdução de ar por estágios;
- Tipologia de sistema de combustão;
- Distribuição de ar;

Depois da fase de secagem da biomassa, o principal parâmetro de controlo do processo é conhecido como a razão de excesso de ar (λ), podendo ser descrito como o quociente entre a quantidade de ar disponível localmente e a quantidade de ar de combustão estequiométrica (Oberberger *et al.*, 2006). As necessidades de ar de combustão dependem das características químicas e físicas do combustível e do excesso de ar usado para arrefecer os sistemas de combustão (Abuelnuor *et al.*, 2014).

Sob ponto de vista teórico, a quantidade de ar disponível localmente deveria ser igual à quantidade de ar estequiométrico ($\lambda = 1$). Contudo, na prática, esta condição não promove boas condições de oxidação do combustível, o que pode estar relacionado, por exemplo, com questões de transferência de massa. Quando λ é inferior a 1, a reação de oxidação do combustível é incompleta, o que se traduz na conversão de apenas uma parte da energia química da biomassa em energia térmica. Por outro lado, quando o valor de λ é muito superior à unidade, o caudal de gases de combustão torna-se muito elevado, o que leva a perdas térmicas excessivas e à diminuição da temperatura do processo (Oberberger *et al.*, 2006). A Figura 3.2 apresenta a relação entre CO/NO_x/eficiência e razão de excesso de ar numa caldeira a *pellets* (pequena escala), evidenciando a gama ótima de funcionamento (Hrdlička *et al.*, 2016).

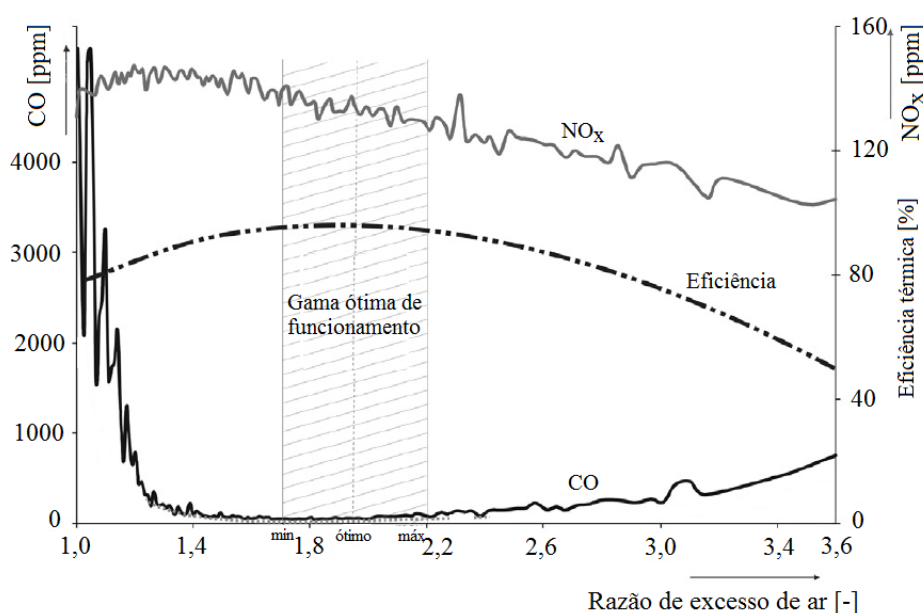


Figura 3.2. Diagrama de controlo de uma caldeira a *pellets* para a regulação do ar de combustão.

Fonte: Adaptado de Hrdlička *et al.* (2016)

Observando a Figura 3.2, verifica-se que a gama ótima de funcionamento para este tipo de sistema está estabelecida para valores de λ entre 1,7 e 2,2, aproximadamente (Hrdlička *et al.*, 2016). No entanto, dependendo da tecnologia de combustão utilizada, a razão de excesso de ar total pode variar entre 1,1 e 1,8, para sistemas de grande escala (Oberberger *et al.*, 2006).

Um λ total reduzido pode ser atingido através da separação dos estágios da combustão em diferentes locais da fornalha, possibilitando um aumento do tempo de residência e um controlo otimizado (Oberberger *et al.*, 2006).

A combustão por estágios¹ é aplicada através da injeção de ar primário no leito de combustível e consecutiva introdução de ar secundário na câmara de combustão, permitindo uma boa mistura do ar com os gases formados na desvolatilização (Nussbaumer, 2003). No primeiro estágio é introduzida apenas uma parte do ar de combustão², estabelecendo-se uma zona rica em combustível (pobre em Oxigénio), traduzindo no excesso de ar de primeiro estágio. No segundo estágio é realizada a injeção do ar necessário para completar a combustão, onde se estabelece uma zona de combustão pobre em combustível (rica em Oxigénio) (Coelho e Costa, 2012). Este método permite fasear a combustão (separando a fase de desvolatilização da fase de combustão de voláteis), reduzindo simultaneamente a temperatura e a concentração de O_2 no primeiro estágio, o que permite uma redução na formação de NO. Por outro lado, permite completar a combustão no segundo estágio em condições pobres em combustível, onde não só é reduzida a produção adicional de NO, como também a presença de componentes inqueimados (Coelho & Costa, 2012; Van Loo & Koppejan, 2008). Deste modo, é alcançada uma mistura eficiente, sendo possível uma operação com uma razão de excesso de ar reduzida (Nussbaumer, 2003).

Neste sentido, é necessário um processo de controlo preciso que permita assegurar o excesso de ar. Atualmente, são utilizados diversos sistemas de controlo de caldeiras, nomeadamente o controlador *Proportional Integral Derivative* (PID), onde o controlo do processo de combustão é conseguido através da regulação da concentração de Oxigénio nos gases de combustão, recorrendo a uma sonda *lambda* (Žandeckis *et al.*, 2013)

Tendo em vista o desempenho ambiental e energético do processo, é essencial considerar o tipo de tecnologia utilizada para o efeito. Assim, os sistemas de combustão em leito fixo com grelhas móveis são bastante importantes, uma vez que a movimentação das grelhas, em conjunto com a distribuição de ar primário, afeta significativamente a mistura e conversão de biomassa no leito de combustível

¹ Para sistemas de combustão modernos, a repartição de ar primário/secundário mais vantajosa é 40/60 (Yin *et al.*, 2008).

² λ_{1^o} = Quantidade de ar introduzido no primeiro estágio / Quantidade de ar estequiométrico.

(Yin *et al.*, 2008). A Subsecção 3.1.2.1 e o Capítulo 4 apresentam as várias características do sistema combustão com grelhas móveis em estudo, estando as suas principais vantagens relacionadas com a possibilidade de separação das diversas fases de combustão e de queimar materiais com menor qualidade. A geometria deste tipo de fornalha permite a movimentação das grelhas de acordo com cada fase do processo e a alteração da percentagem de ar administrada em cada etapa da combustão, possibilitando maximizar a eficiência do sistema e otimizar o desempenho ambiental do processo.

3.1.2 TECNOLOGIAS DE COMBUSTÃO

A seleção e conceção de qualquer sistema de combustão de biomassa depende, principalmente, das características do combustível a utilizar, da legislação em matéria de ambiente aplicada no local, dos custos e do desempenho dos equipamentos necessários ou disponíveis e da energia e capacidade requeridas/desejadas (Van Loo & Koppejan, 2008).

As principais tecnologias de combustão de biomassa para aplicações de energia (calorífica e elétrica) são igualmente usadas para a queima de carvão: combustível pulverizado, leito fluidizado e leito fixo (Rosendahl, 2013). Uma vez que o trabalho a desenvolver na empresa se foca em caldeiras de leito fixo, apenas será apresentada a descrição associada a este tipo de sistema.

Os sistemas de combustão em **leito fixo** (Figura 3.3) incluem fornalhas com grelhas. O ar primário atravessa o leito, onde ocorrem as seguintes fases de combustão: secagem, desvolatilização e combustão do *char*. Os gases de exaustão produzidos são queimados através da adição de ar secundário, normalmente, numa zona de combustão separada do leito de combustível (Van Loo & Koppejan, 2008).

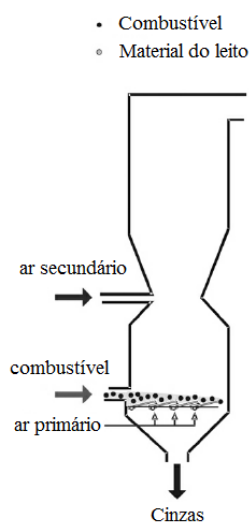


Figura 3.3. Tecnologia de combustão em leito fixo.
Fonte: Adaptado de Van Loo & Koppejan (2008).

A utilização de fornalhas com grelhas é apropriada para combustíveis derivados de biomassa com elevado teor de humidade, com partículas de diversas dimensões e com teor de cinzas elevado (Van Loo & Koppejan, 2008).

A grelha localiza-se na parte inferior da câmara de combustão e tem duas funções principais: o suporte do combustível e a distribuição do ar primário, injetado por baixo da grelha. Este elemento pode ser arrefecido através da utilização de água ou de ar (primário) (Yin *et al.*, 2008).

As fornalhas de leito fixo podem ter diversas tipologias, nomeadamente: grelhas fixas, grelhas fixas com alimentação inferior (*underfeed stokers*), grelhas estacionárias inclinadas, grelhas móveis (horizontais/inclinadas), grelhas *travelling*, grelhas rotativas, grelhas vibratórias e grelhas *reciprocating*. (Rosendahl, 2013; Van Loo & Koppejan, 2008). Rosendahl (2013), Dahlquist (2013), Van Loo & Koppejan (2008) e Yin *et al.* (2008) apresentam as principais características das grelhas apresentadas.

3.1.2.1 GRELHA *RECIPROCATING*

A fornalha com grelhas *reciprocating* integra grelhas móveis intercaladas com grelhas fixas, onde o movimento das grelhas é descrito como sendo alternado, o que se traduz em avanços e recuos da grelha à medida que a combustão se processa. Esta tipologia de grelha impulsiona a deslocação do combustível ao longo do leito da fornalha (Dahlquist, 2013; Yin *et al.*, 2008). A movimentação presente neste tipo de sistema permite uma homogeneização do leito de combustível otimizada, promovendo uma combustão completa (Rosendahl, 2013). Esta tecnologia possibilita uma mistura de ar/combustível mais eficiente, melhorando a queima do Carbono presente no combustível (Yin *et al.*, 2008). A Figura 3.4 apresenta um esboço de uma fornalha com grelha *reciprocating*, dado por Rosendahl (2013).

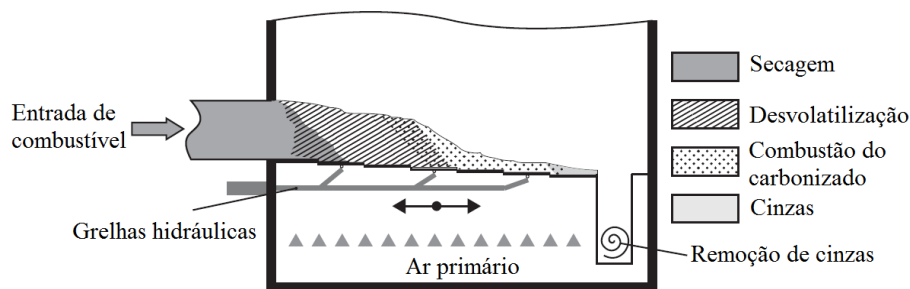


Figura 3.4. Grelha *reciprocating*.
Fonte: Adaptado de Rosendahl (2013).

O sistema de injeção de ar primário localiza-se na parte inferior da fornalha e divide-se em várias secções independentes entre si. A regulação de passagem de ar em cada uma das secções é independente e controlada pela abertura de uma válvula, permitindo a distinção de cada uma das

fases do processo de combustão. O ar primário é o principal agente da combustão e a regulação da quantidade deste na fornalha é determinante para o processo em análise (Van Loo & Koppejan, 2008).

A conversão primária do combustível ocorre na grelha. Os produtos gasosos da secagem, desvolatilização e oxidação do *char* ascendem na fornalha e são oxidados por ação do ar secundário, injetado na parte superior da caldeira, com o intuito de dar continuidade ao processo de combustão (Razmjoo *et al.*, 2014). A admissão de ar secundário aos gases de combustão permite queimar a matéria gasosa com potencial combustível, reduzir o teor de compostos nocivos no ambiente e na saúde humana, controlar a temperatura dos gases de exaustão, através da variação do seu caudal, e aumentar a eficiência do sistema (Van Loo & Koppejan, 2008).

O ajuste da frequência de movimentação das grelhas permite a otimização do desempenho ambiental do processo. No entanto, é um procedimento complexo, uma vez que frequências demasiado altas conduzem a maiores concentrações de material inqueimado nas cinzas e frequências demasiado baixas levam a um aumento excessivo da altura do material no leito, bloqueando a passagem de ar primário e condicionando a combustão (Razmjoo *et al.*, 2014; Van Loo & Koppejan, 2008).

Quando as cinzas provenientes da combustão da biomassa atingem o fim na grelha, são transportadas para fora da caldeira através de um sistema de recolha (Yin *et al.*, 2008). Posteriormente, as cinzas recolhidas são armazenadas e depositadas em aterro (Van Loo & Koppejan, 2008)

Razmjoo *et al.* (2014) desenvolveram um estudo onde foram analisadas as emissões gasosas decorrentes do processo de combustão numa fornalha com grelha *reciprocating* com uma potência de 4 MW. A Figura 3.5 ilustra a fornalha do caso de estudo citado e a Figura 3.6 apresenta a separação das diversas etapas do processo de combustão (Razmjoo *et al.*, 2014).

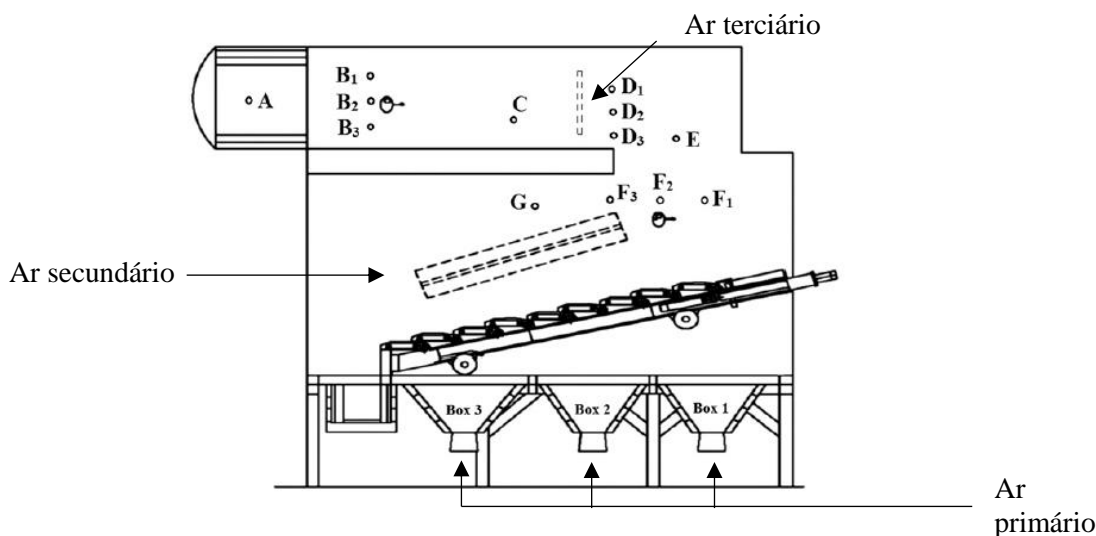


Figura 3.5. Esquema da caldeira com grelha *reciprocating*.
Fonte: Adaptado de Razmjoo *et al.* (2014)

Onde:

- A, B₁, B₂, B₃, C, D₁, D₂, D₃, E, F₁, F₂, F₃ e G – tomas para análise de temperatura e gases (CO, O₂, NO).

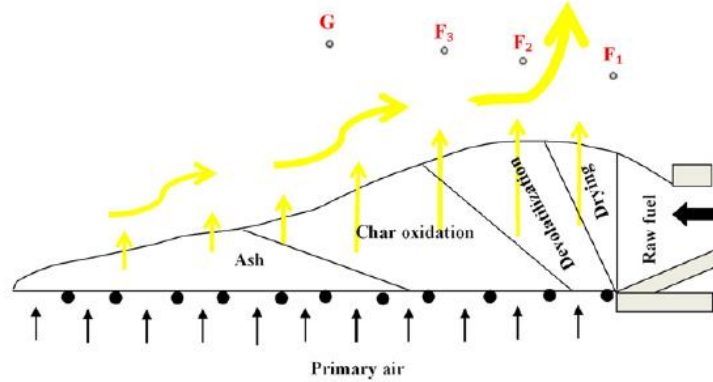


Figura 3.6. Esquema do progresso da combustão no leito da fornalha.

Fonte: Razmjoo *et al.* (2014)

Analisando os resultados obtidos no estudo realizado por Razmjoo *et al.* (2014), concluiu-se que os maiores níveis de emissão de CO foram medidos nas tomas F₁, F₂, F₃ e G, o que significa que todas as fases de combustão (secagem, desvolatilização e combustão do *char*) são críticas para a formação de CO.

3.1.3 IMPACTO AMBIENTAL

A biomassa é um biocombustível que pode proporcionar uma redução significativa nas emissões líquidas de Carbono quando comparado com os combustíveis fósseis (Li *et al.*, 2015). Contudo, apesar dos benefícios expostos na Secção 2.1 (eg. recurso renovável e “neutro de CO₂”), a utilização de biomassa como combustível apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente a formação de poluentes.

As emissões de gases de exaustão provenientes da combustão da biomassa estão estreitamente relacionadas não só com as propriedades do combustível, mas também com as condições de funcionamento na fornalha. Assim, a formação de poluentes é afetada por diversos parâmetros operatórios, incluindo o excesso de ar, a temperatura de combustão, a qualidade de mistura e tempo de residência (Zhang *et al.*, 2010). Os poluentes podem ser organizados em duas classes principais (Khan *et al.*, 2009):

1. Poluentes inqueimados (incluindo CO, *tar* (alcatrão), PAH, C_xH_y e partículas de *char*)

2. Poluentes produzidos durante a combustão (formação de cinzas e de poluentes gasosos associados à presença de Azoto e Enxofre na fornalha, nomeadamente Material Particulado (MP), NO_x (Óxidos de Azoto) e SO_x (Óxidos de Enxofre).

A emissão destes compostos é nociva tanto para o ambiente como para a saúde humana. De uma forma geral, os impactos ambientais associados às tecnologias de conversão termoquímica de biomassa são os seguintes (Abbasi & Abbasi, 2010):

- Poluição do ar – emissões de Material Particulado, Óxidos de Carbono, de Enxofre e de Azoto;
- Emissões Orgânicas – em particular dioxinas e hidrocarbonetos;
- Formação de resíduos sólidos – Cinzas de fundo e cinzas volantes, que podem conter substâncias tóxicas;
- Pressão nos recursos.

Embora a combustão de biomassa seja a técnica mais antiga para a conversão de biomassa em energia, ainda há um grande desafio para desenvolver e melhorar novos sistemas, mais eficientes sob ponto de vista energético e ambientalmente mais compatíveis em pequena e grande escala (Obernberger, 1998). Desta forma, reduzir as emissões de gases de combustão tornou-se agora o principal foco para o recente desenvolvimento de sistemas de combustão de biomassa (Zhang *et al.*, 2010)

3.1.3.1 FORMAÇÃO DE CO

A conversão do Carbono presente no combustível em Dióxido de Carbono ocorre através de vários passos elementares e por vários percursos reacionais distintos. O Monóxido de Carbono é o intermediário final mais importante no processo de combustão, sendo denominado como um composto inqueimado, formado quando a combustão é incompleta (Sartor *et al.*, 2014; Khan *et al.*, 2009; Van Loo & Koppejan, 2008).

A taxa à qual o CO é oxidado a CO₂ depende, principalmente, da temperatura (Figura 3.7). Quanto maior a temperatura do efluente gasoso, menor a concentração do CO nos gases de combustão. Por outro lado, a emissão de CO é mais reduzida numa relação de excesso de ar específica (Van Loo & Koppejan, 2008). Razões de excesso de O₂ elevadas (baixa carga – misturas pobres em combustível), resultam numa diminuição da temperatura de combustão. Por outro lado, razões de excesso de O₂ reduzidas (alta carga – misturas ricas em combustível), resultam em condições de mistura

inadequadas (Roy *et al.*, 2013). Além disso, um tempo de residência suficiente é importante para atingir baixos níveis de emissão de CO, principalmente porque o CO é, por norma, um intermediário cuja formação é mais tardia do que a dos hidrocarbonetos. É ainda importante referir que a turbulência do sistema deve ser adequada, por forma a garantir um grau de mistura entre o comburente e o combustível suficiente, evitando a presença de inqueimados no efluente (Van Loo & Koppejan, 2008).

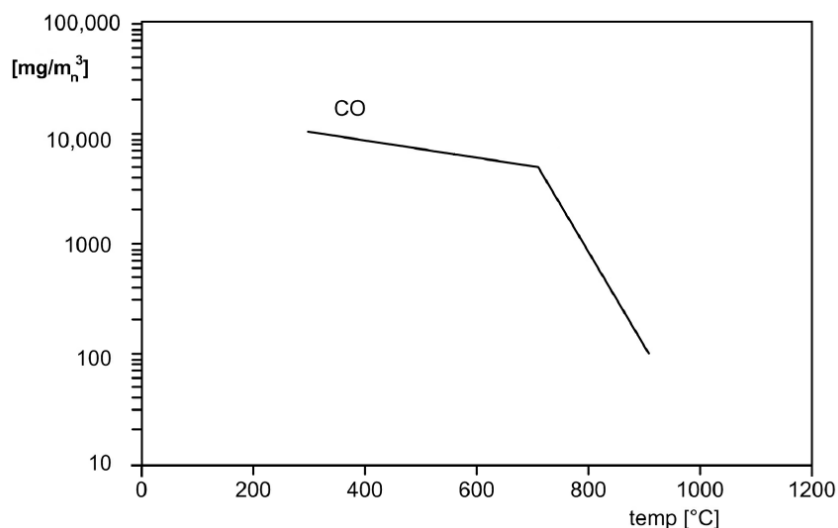


Figura 3.7. Influência da temperatura na formação de CO em processos de combustão.

Fonte: Adaptado de Van Loo & Koppejan (2008).

O CO tem graves implicações na saúde do ser humano. Quando inspirado, o CO difunde-se rapidamente pela membrana capilar alveolar, ligando-se com a hemoglobina e formando a carboxihemoglobina. A afinidade da hemoglobina pelo CO é 240 vezes maior do que a do O₂ (Levy, 2015). A exposição a Monóxido de Carbono é particularmente perigosa para fetos, bebés e pessoas com anemia ou com histórico de doença cardíaca. A inalação de baixas concentrações deste composto pode causar fadiga e fomentar dores no peito em indivíduos com problemas cardiovasculares. A exposição a níveis elevados causa dores de cabeça, tonturas e fraqueza em pessoas saudáveis, podendo ainda provocar sonolência, náuseas, vômitos, confusão e desorientação. Para níveis muito elevados, causa perda de consciência e morte (WHO, 2008)

3.1.3.2 FORMAÇÃO DE NO

O Azoto presente no combustível e no ar de combustão é, de uma forma geral, convertido na totalidade em N₂ e NO_x (na forma gasosa), durante o processo de combustão. O segundo componente apresenta impactos significativos no ambiente e na saúde humana, tornando-se um elemento de interesse aquando do estudo do processo de combustão de biomassa (García *et al.*, 2014a).

A palavra NO_x refere-se tanto a NO (Monóxido de Azoto) como a NO₂ (Dióxido de Azoto), embora a maior parte dos Óxidos de Azoto sejam emitidos sob forma de NO durante o processo de combustão (Flagan & Seinfeld, 1988; Sartor *et al.*, 2014). De acordo Glarborg *et al.* (2003), os Óxidos de Azoto produzidos em processos de combustão advêm de duas fontes distintas: da oxidação do Azoto molecular proveniente do ar de combustão e da oxidação do Azoto quimicamente ligado ao combustível (Glarborg *et al.*, 2003). Visto que a formação de NO é a mais expressiva no que diz respeito os Óxidos de azoto, interessa conhecer os diversos mecanismos de produção de NO durante a combustão:

Thermal-NO: resulta da oxidação do N₂ atmosférico, baseada no mecanismo de *Zeldovich* estendido – reação (i) a (iii) (Glarborg *et al.*, 2003):



A elevada energia de ativação da reação³ (i) limita o mecanismo de *Zeldovich*. Assim, a produção de NO por este mecanismo prossegue a uma taxa mais lenta do que a oxidação dos componentes de combustível e é extremamente sensível à temperatura, tornando-se apreciável a temperaturas superiores a 1800 K (Flagan & Seinfeld, 1988; Glarborg *et al.*, 2003).

Prompt-NO: O NO pode ser formado a partir do N₂ presente no ar através de uma forma diferente do mecanismo térmico. O processo em questão ocorre a baixas temperaturas, condições ricas em combustível e tempos de residência curtos. Este mecanismo foi identificado pela primeira vez por *Fenimore* em 1971. Ao estudar a formação de NO em chamas de hidrocarbonetos, *Fenimore* concluiu que o NO formado no início da chama era resultado do ataque de um radical livre de hidrocarboneto no Azoto atmosférico (reação (iv)) (Flagan & Seinfeld, 1988).



O composto de Ciano (HCN) resultante da reação (iv) pode ser convertido em compostos intermédios que potenciam a formação de NO, através do seguinte conjunto de reações (reação v a viii) (Flagan & Seinfeld, 1988):



³ Para quebrar ligação covalente tripla do N₂.



Sob condições ricas em combustível, a concentração de radicais de hidrocarbonetos aumenta para níveis capazes de dissociar o Azoto molecular, tornando este mecanismo uma possível fonte de NO. As reações deste mecanismo parecem ter uma energia de ativação relativamente baixa, sendo a sua dependência da temperatura marginal relativamente ao observado para o mecanismo anterior (NO-térmico). Devido à formação precoce (ou seja, na chama em vez da formação de gases pós-chama) de NO por este mecanismo é frequentemente referido como *NO-prompt* (imediatos) (Flagan & Seinfeld, 1988).

Fuel-NO: O Azoto quimicamente ligado ao combustível é convertido, por oxidação, em NO (> 90%) e NO₂ (<10%) através de uma série de reações elementares, onde intervêm componentes primários importantes: NH_i e HCN, que potenciam a produção de NO por reações análogas às requeridas para a formação de *NO-prompt*. Se a disponibilidade de O₂ for suficiente, o NH_i e HCN serão principalmente convertidos em NO através de diferentes vias de reação. Contudo, em condições ricas em combustível, o NO reagirá com NH_i e HCN, formando N₂ (Figura 3.8) (Flagan & Seinfeld, 1988; Van Loo & Koppejan, 2008).

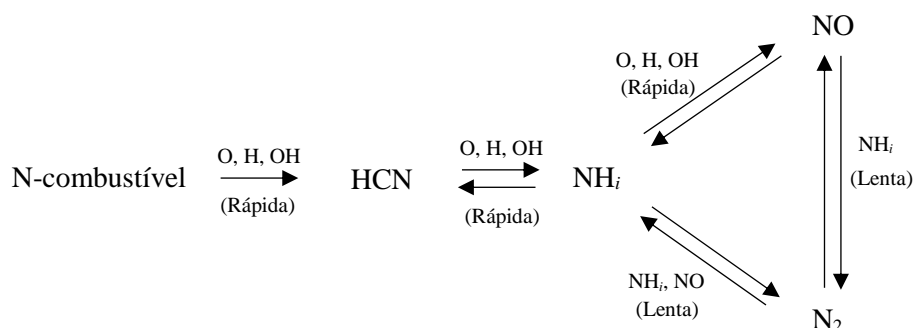


Figura 3.8. Mecanismo de formação de *Fuel-NO*.

Fonte: Adaptado de Flagan & Seinfeld (1988).

Adicionalmente, o Azoto presente no combustível pode ser retido no *char*, sendo oxidado a NO na fase de combustão do resíduo carbonoso. No entanto, pode, subsequentemente, ser reduzido a N₂ por uma reação heterogénea rápida com o *char* (Van Loo & Koppejan, 2008). A distribuição do Azoto entre os voláteis e o resíduo carbonoso depende principalmente da estrutura do combustível e da temperatura (Glarborg *et al.*, 2003). As emissões de NO pelo mecanismo *fuel-NO* aumentam com o incremento do teor de Azoto no combustível, excesso de ar e temperatura de combustão, até a um

nível onde todos os compostos intermediários de Azoto foram convertidos em NO, N₂O ou N₂ (Van Loo & Koppejan, 2008).

A formação de *thermal-NO* é bastante reduzida uma vez que as fornalhas, por norma, não atingem temperaturas muito elevadas (Oberberger *et al.*, 2006). A formação de NO pelo mecanismo imediato é altamente dependente da presença de radicais de hidrocarbonetos. Uma vez que a taxa de oxidação do combustível é elevada, a concentração de radicais de hidrocarbonetos apresenta-se bastante reduzida, tornando a reação (iv) negligenciável (Flagan & Seinfeld, 1988). Assim, no processo de combustão de biomassa, o Azoto ligado ao biocombustível é o principal agente para a formação de NO (Nussbaumer, 2003; Oberberger, 1998).

A família dos Óxidos de Azoto e os seus derivados têm uma ampla gama de impactos na saúde do ser humano e no ambiente. A exposição a NO_x leva a problemas do foro respiratório, prejudicando o sistema imunitário, aumentando inflamações respiratórias e diminuindo as funções e o crescimento dos pulmões. Os NO_x reagem instantaneamente com produtos químicos orgânicos comuns e até mesmo com Ozono, formando diversos produtos tóxicos (eg. radicais de nitrato, nitrosaminas, entre outros). Os Óxidos de Azoto e o Dióxido de Enxofre reagem com outros elementos na atmosfera, resultando em chuvas ácidas, fenómeno prejudicial à saúde dos ecossistemas (Boningari & Smirniotis, 2016)

3.1.3.3 ENQUADRAMENTO LEGAL

A legislação que suporta o desenvolvimento sustentável tem vindo a induzir o setor industrial a aumentar a partilha de energia produzida por combustíveis renováveis. Desta forma, a combustão de biomassa está a tornar-se um foco de atenção para este setor (Boriouchkine *et al.*, 2012). No entanto, é necessário monitorizar as condições de operação destes sistemas, com o intuito de analisar a composição dos efluentes gasosos resultantes do processo de combustão, bem como o cumprimento legal associado a esta.

Na União Europeia foram desenvolvidas múltiplas Diretivas relativas ao conceito de biomassa e aos sistemas de combustão. Destaca-se a Diretiva (UE) 2015/2193 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de novembro de 2015, relativa à limitação das emissões para a atmosfera de certos poluentes provenientes de médias instalações de combustão (aplicável a instalações de combustão com uma potência térmica nominal igual ou superior a 1 MW e inferior a 50 MW) (APA, 2017).

No direito português existem vários documentos relativos à emissão de poluentes para a atmosfera: o Decreto-Lei n° 78/2004, de 3 de abril, assegura que é fundamental recorrer a medidas e a procedimentos apropriados para a prevenção e controlo das emissões atmosféricas, decorrentes das

descargas provocadas pelas instalações abrangidas pelo Decreto-Lei, com o intuito de reduzir e evitar a poluição atmosférica, tendo em vista proteção do ambiente e da saúde do ser humano. Para além do Decreto-Lei supracitado, existem portarias (diplomas legais que regulamentam o Decreto-Lei apresentado) para estabelecer os limites legais para a emissão de poluentes (VLE – Valor Limite de Emissão), nomeadamente (APA, 2017):

- Portaria nº 675/2009, de 23 de junho, que fixa os valores limite de emissão de aplicação geral (VLE gerais) aplicáveis às instalações abrangidas pelo Decreto-Lei supracitado;
- Portaria nº 677/2009, de 23 de junho, que fixa os valores limite de emissão aplicáveis às instalações de combustão abrangidas pelo Decreto-Lei supracitado.

Na Tabela 3.3 são apresentados os VLE para os vários poluentes a serem analisados na caldeira a biomassa.

Tabela 3.3. VLE para fornalhas/caldeiras a biomassa.

Poluente	VLE [mg·Nm ⁻³]	Observações
CO	500	mg·Nm ⁻³ , em gás seco com 11% de O ₂ e em condições de pressão e temperatura normalizadas (P _N = 101,3 kPa e T _N = 273,15 K) e NO _x expresso em NO ₂
NO _x	650	

Fonte: Portaria nº 677/2009, Decreto-Lei nº 78/2004

4 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Este capítulo apresenta os vários componentes presentes na Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda., no que diz respeito ao sistema de combustão com grelhas móveis – Sistema *Plug & Heat*. A informação utilizada para a escrita deste capítulo é cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda, (*dossier técnico*). Para além dos diferentes constituintes da caldeira, é exposto o equipamento auxiliar utilizado para alimentar a fornalha, para extrair e limpar o efluente gasoso e para a monitorização das condições de operação.

4.1 CALDEIRA

O sistema *Plug & Heat* (Figura 4.1) foi dimensionado para uma potência nominal de 581 kW_{th} e é constituído por uma tremonha de armazenamento de biomassa (1), um sem-fim inclinado de alimentação de biomassa (2), uma fornalha com um sistema de grelhas móveis (*reciprocating*) (3), dois permutadores de calor (um horizontal (4) e um vertical (5)) e a ligação entre permutadores (6).

A caldeira desenvolvida pela empresa foi desenhada por módulos, integrando um conjunto de equipamentos autónomos e separados. Este tipo de construção apresenta duas vantagens: possibilitar uma maior versatilidade para o sistema e facilitar as operações de manutenção e substituição de componentes (Ventil, 2017).

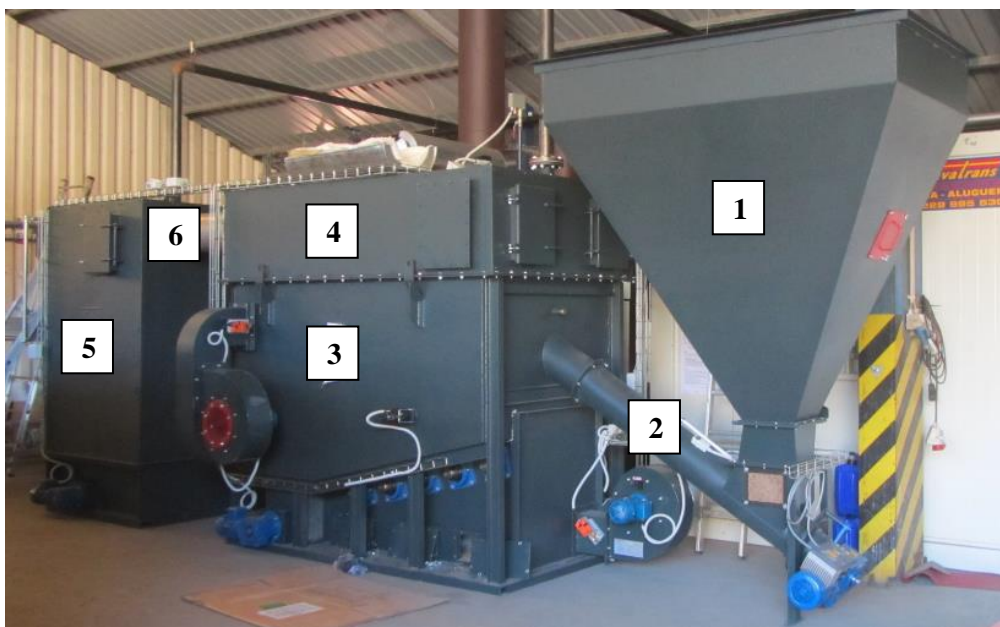


Figura 4.1. Caldeira Ventil-Engenharia do Ambiente.
Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2017)

A biomassa entra na fornalha com auxílio de um sem-fim de alimentação, caindo para a parte superior do sistema de grelhas móveis, onde ocorre o transporte longitudinal do biocombustível até ao sistema de descarga das cinzas de fundo resultantes do processo de combustão. Com o intuito de minimizar a interação com o interior da caldeira, foi instalado um equipamento automático de ignição da biomassa (Ventil, 2017).

4.1.1 FORNALHA COM SISTEMA DE GRELHAS MÓVEIS

O sistema de grelhas móveis tem como finalidade permitir a utilização de combustíveis derivados de biomassa de qualidade inferior, ricos em cinzas e com poder calorífico baixo. A tecnologia aplicada às grelhas é do tipo *reciprocating*, onde o movimento das grelhas é recíproco, traduzindo-se em avanços e recuos da grelha, o que possibilita a mistura e movimentação da biomassa em diversos estágios da combustão (Ventil, 2017).

A fornalha é constituída por fileiras de grelhas alternadas, quatro móveis e seis fixas, com uma pequena inclinação que possibilita a queda de biomassa sem deslizamento por gravidade. A movimentação das grelhas é realizada por ação de cilindros hidráulicos, onde a terceira (cilindro 1 → secção 1), quinta, sétima (cilindro 2 → secção 2) e nona (cilindro 3 → secção 3) filas de grelhas apresentam mobilidade, ao passo que as restantes se encontram fixas. Uma vez que cada cilindro é independente entre si, há a possibilidade de realizar o movimento de avanço e recuo a diferentes ciclos e/ou velocidades, dependendo das necessidades e parâmetros de controlo da caldeira. Dispõe ainda de três zonas isoladas, na parte inferior da grelha, onde é administrado o ar primário por um ventilador centrífugo. O controlo do ar é conseguido através de servomotores, aparelhos capazes de limitar a abertura de válvulas borboleta, regulando assim a entrada de ar no sistema. A introdução de ar primário tem duas funções principais: distribuir ar para o processo de combustão e arrefecer as grelhas, atrasando a degradação das mesmas, prolongando, desta forma, o tempo de vida destas (Ventil, 2017).

Esta estrutura é bastante vantajosa uma vez que permite controlar, de forma eficiente, o caudal de ar admitido em cada zona, possibilitando a distinção das diferentes fases do processo de combustão: secagem (secção 1), combustão do *char* (secção 2) e formação de cinzas (secção 3). Assim, como a percentagem de ar necessária varia de fase para fase, a operação é facilitada e o processo de combustão apresenta-se mais eficiente e completo, tornando-se mais favorável de ponto de vista ambiental.

Para além da injeção de ar primário, o sistema dispõe de entradas de ar adicionais: ar secundário e ar terciário. O ar secundário é responsável pela oxidação dos voláteis, favorecendo uma combustão

mais completa. Previne-se, portanto, assim a emissão de determinados poluentes orgânicos (decorrentes de uma combustão incompleta) em concentrações acima do limite legal. As entradas de ar secundário estão situadas nas paredes laterais, acima do nível da biomassa. O ar terciário é característico dos sistemas de combustão Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. e apresenta a mesma função do ar secundário. Este último é introduzido no local de passagem dos gases entre a fornalha e o permutador horizontal. A introdução de ar secundário e terciário é realizada por ação de um ventilador introdução de ar de combustão para dois níveis distintos e a regulação do caudal de ar para cada um dos níveis faz-se de forma análoga ao controlo de caudal de ar primário (Ventil, 2017).

4.1.2 PERMUTADOR HORIZONTAL

Os gases de combustão saem da fornalha em direção ao permutador horizontal, componente com duas funções essenciais: proporcionar a transferência de calor entre os gases e a água, maioritariamente por radiação, e permitir o aumento do volume total disponível para a combustão, funcionando como uma câmara de combustão secundária. O incremento do volume possibilita o aumento do tempo de residência dos gases no sistema de combustão, o que leva a uma minimização da produção de determinados poluentes (CO e compostos de NO_x), prejudiciais à eficiência do processo e ao ambiente. Adicionalmente, o permutador possibilita a passagem dos gases para o permutador de calor vertical (Ventil, 2017).

Os gases resultantes do processo de combustão contêm Material Particulado de pequenas dimensões que será arrastado ao longo de toda a caldeira. Contudo, se a energia cinética deste material diminuir de forma abrupta, as partículas vão depositar-se em zonas “mortas” (por exemplo, tubos), havendo necessidade de realizar uma limpeza frequente dos tubos e restantes zonas. Por este motivo, foram instaladas portas de acesso ao interior do permutador (Ventil, 2017).

Após terem percorrido a câmara de combustão secundária, os gases invertem o sentido entrando em dois tubos, por onde são conduzidos à saída do permutador horizontal para dar entrada no permutador vertical. Estes dois tubos encontram-se submersos em água, transmitindo parte do calor dos gases para a água (Ventil, 2017).

4.1.3 PERMUTADOR VERTICAL

O permutador vertical, presente na caldeira em estudo, é do tipo permutador com tubos de fumo e tem como objetivo o aquecimento de água. Este equipamento é composto por uma rede de tubos imersos em água, onde a transferência de calor é feita através da circulação dos gases pelo interior dos tubos. Este sistema é isolado termicamente na sua totalidade, com o fim de reduzir as perdas de

calor por convecção para a atmosfera. Possui duas caixas de fumos superiores (onde se dá a entrada dos gases vindos da fornalha e saída após passagem no permutador) e uma caixa de inversão de fumos com um sem-fim de extração de cinzas (Ventil, 2017).

Os gases quentes, depois de saírem do permutador horizontal, seguem para a caixa de fumos superior, entrando nos tubos, local onde ocorre uma importante e significativa transferência de energia calorífica para a água. Posteriormente, quando os gases atingem a parte inferior do permutador (caixa de inversão dos fumos), invertem o sentido, entrando no segundo grupo de tubos, dado que o permutador é de dupla passagem. Esta inversão permite a transferência de parte do restante calor para a água, antes de chegar à caixa de fumos superior do lado direito do permutador (Ventil, 2017).

A água “fria” entra pela parte inferior do permutador e sai pelo lado superior oposto ao da entrada do equipamento, fazendo um circuito fechado quando sai do permutador horizontal e volta a entrar no permutador vertical. Com o intuito de maximizar o aproveitamento de calor transferido dos tubos para a água, grande parte do fluxo de água no seu interior é transversal aos tubos, criando-se chicanas. Estas chicanas impedem o fluxo de água “direto” entre a entrada e saída, obrigando a uma passagem por todos os tubos (Ventil, 2017).

O sistema integra “turbuladores” espirais, que se encontram no interior dos tubos. Os turbuladores incorporam um sistema de vibração que, juntamente com a sua morfologia, permite não só aumentar consideravelmente a turbulência no fluxo dos gases, incrementando o seu coeficiente de transferência de calor, como prevenir o fenómeno de *fouling*, caracterizado pela deposição/incrustação de cinzas nas paredes do sistema (Ventil, 2017).

As partículas presentes nos gases de exaustão tendem a depositar-se quando perdem energia cinética, devido à redução de velocidade que ocorre, sobretudo, na caixa de inversão de fumos. Por essa razão, existe um sistema automático de remoção de cinzas na parte inferior, evitando-se momentos de paragem do sistema para proceder à sua limpeza (Ventil, 2017).

O permutador está dividido em 2 corpos independentes, parte superior e caixa de inversão de fumos. Esta morfologia permite uma maior flexibilidade do sistema e facilita o acesso, em caso de necessidade de manutenção. Todas as zonas de passagem de gás possibilitam o acesso para limpeza ou qualquer outra necessidade de manutenção (Ventil, 2017).

Posteriormente, os gases são removidos do Permutador Vertical e conduzidos para um sistema de tratamento de efluentes gasosos (multiciclone), onde ocorre a remoção de partículas para promoção da proteção ambiental e cumprimento da legislação em vigor. Finalmente, o efluente gasoso é descarregado para a atmosfera através de um ventilador de exaustão e de uma chaminé.

4.2 EQUIPAMENTO AUXILIAR

4.2.1 ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA

A fornalha em análise é alimentada através de um sem-fim de alimentação (inclinado) com passos variáveis, onde foram transportadas *pellets* de madeira (Figura 4.2), material usado como combustível no caso em estudo. O equipamento de alimentação apresenta um número máximo de 6 rotações por minuto (rpm), integrando um moto-redutor que opera entre 0 e 60 Hertz (Hz), movimentando o sistema.



Figura 4.2. Sem-fim de alimentação à fornalha (à esquerda) e *pellets* de madeira (à direita).

O sem-fim de alimentação opera em contínuo⁴, o que permite a redução do risco de retorno de chama, impedindo, deste modo, a propagação da combustão de biomassa até ao sistema de armazenamento (tremonha/silo) (Ventil, 2015).

Os sem-fim presentes na Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. incorporam sistemas de segurança, nomeadamente um sistema de deteção e extinção de incêndio, que tem como finalidade detetar e extinguir um possível retorno de chama e a combustão para o interior do sistema de alimentação. Esta operação pode ser realizada com recurso a um sistema elétrico ou a um sistema mecânico. O primeiro ativa uma eletroválvula de descarga de água no sem-fim, quando a sonda de temperatura de superfície deteta temperaturas superiores a 80 °C. O segundo é um dispositivo de ativação secundária, com a mesma função do equipamento elétrico, que é acionado em caso de falha elétrica (Ventil, 2015).

A Tabela 4.1 apresenta a análise imediata do biocombustível utilizado, incluindo o poder calorífico superior e inferior. A Tabela 4.2 exhibe a análise elementar da biomassa. Para além das informações presentes na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2, interessa conhecer a razão mássica de água no combustível ($W_{wR} = 0,077 \text{ kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ R}$) e a massa volúmica do mesmo ($\rho_{biomassa} = 605 \text{ kg B} \cdot \text{m}^{-3}$).

⁴ Salvo raras exceções, presentes na Subsecção 4.2.6

Tabela 4.1. Análise imediata de *pellets* de madeira (% mássica, btq, e PCS e PCI).

Cinzas	Humidade	Matéria Volátil	Carbono Fixo	PCS_{bs} [$J \cdot kg^{-1}$ R]	PCI_{bs} [$J \cdot kg^{-1}$ R]
0,8	6,5	83,6	15,6	$20,8 \times 10^6$	$18,9 \times 10^6$

Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2017).

Tabela 4.2. Análise elementar de *pellets* de madeira (em bs)⁵

w_{CR} [$kg\ C \cdot kg^{-1}$ R]	w_{HR} [$kg\ H \cdot kg^{-1}$ R]	w_{NR} [$kg\ N \cdot kg^{-1}$ R]	w_{SR} [$kg\ S \cdot kg^{-1}$ R]	w_{OR} [$kg\ O \cdot kg^{-1}$ R]	w_{ZR} [$kg\ Z \cdot kg^{-1}$ R]
0,474	0,0633	0,0071	0,0001	0,44776	0,00774

Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2017).

Onde:

- $PCS_{bs} \rightarrow$ Poder Calorífico Superior [$J \cdot kg^{-1}$ R];
- $PCI_{bs} \rightarrow$ Poder Calorífico Inferior [$J \cdot kg^{-1}$ R];
- $w_{CR} \rightarrow$ Fração mássica de Carbono [$kg\ C \cdot kg^{-1}$ R];
- $w_{HR} \rightarrow$ Fração mássica de Hidrogénio [$kg\ H \cdot kg^{-1}$ R];
- $w_{SR} \rightarrow$ Fração mássica de Enxofre [$kg\ S \cdot kg^{-1}$ R];
- $w_{OR} \rightarrow$ Fração mássica de Oxigénio [$kg\ O \cdot kg^{-1}$ R];
- $w_{NR} \rightarrow$ Fração mássica de Azoto [$kg\ N \cdot kg^{-1}$ R];
- $w_{ZR} \rightarrow$ Fração mássica de Cinzas [$kg\ Z \cdot kg^{-1}$ R];

4.2.2 IGNIÇÃO

O sistema de ignição, como referido anteriormente, é automático (a ar quente), minimizando a interação do operador com interior da fornalha, evitando riscos para a integridade do indivíduo. A Figura 4.3 apresenta o equipamento de ignição da biomassa presente na empresa.



Figura 4.3. Equipamento de ignição acoplado à fornalha.

⁵ R representa a biomassa em base seca; B representa a biomassa em base tal e qual.

4.2.3 SISTEMA DE INTRODUÇÃO DE AR

O ar de combustão é injetado na caldeira através de ventiladores centrífugos (modelo RM 280/2 com uma potência instalada de 0,75 kW e 2830 rpm – ventilador de ar primário; modelo RM 280/R2 com uma potência instalada de 0,55 kW e 2780 rpm – ventilador de ar secundário/terciário). Os ventiladores presentes na caldeira funcionam em dois níveis distintos: o primário e o secundário/terciário.

O ventilador centrífugo responsável pela introdução de ar primário na fornalha apresenta uma conduta seccionada em três partes, onde cada secção contém uma válvula de borboleta ligada a um servomotor de regulação que permite diferentes aberturas, possibilitando a variação do caudal de ar injetado na caldeira. A Figura 4.4 ilustra a divisão das secções da conduta do ventilador para cada entrada de ar primário (cada zona) na fornalha.

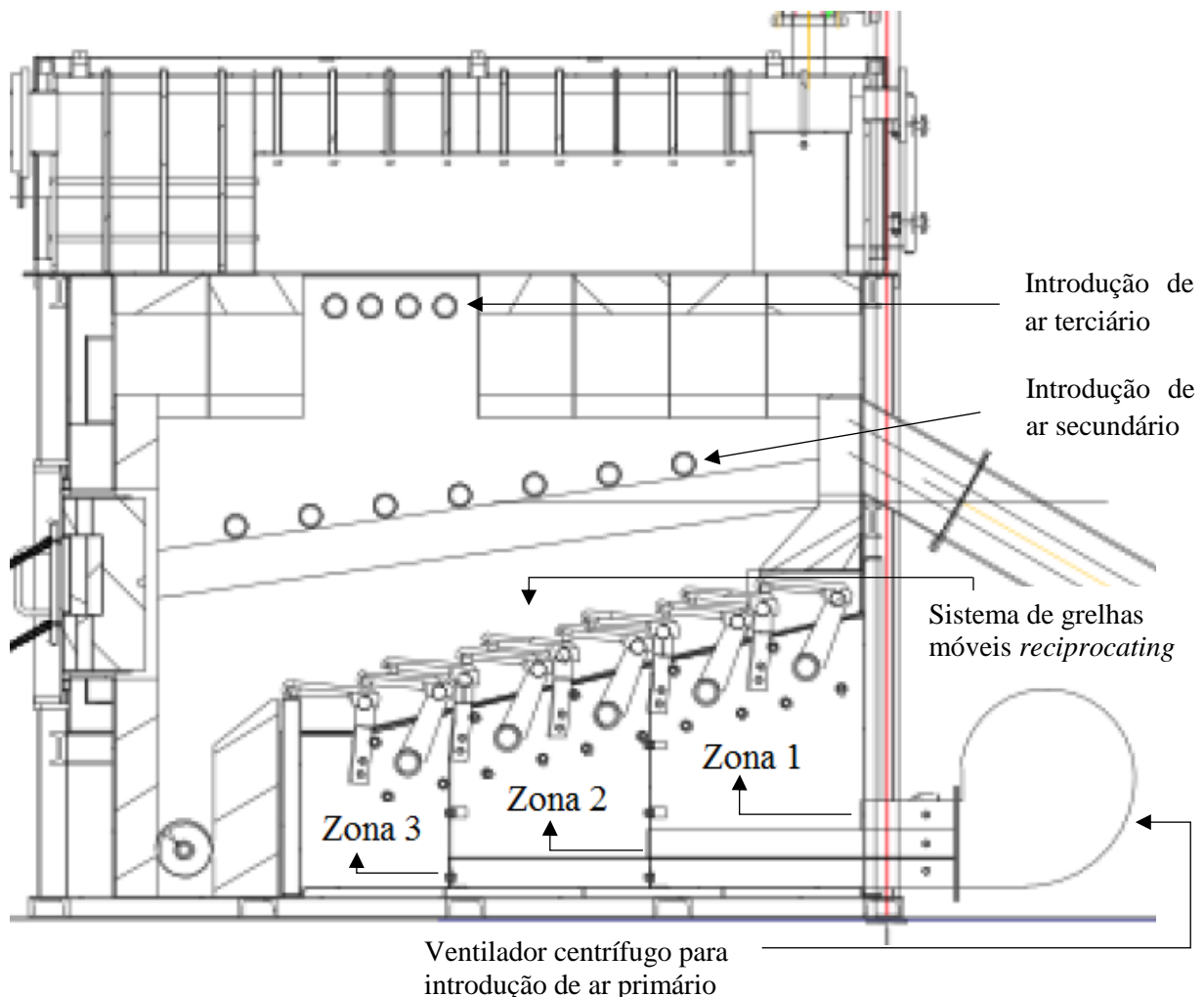


Figura 4.4. Esquema da introdução de ar primário na fornalha.

Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2017)

O ar secundário/terciário é introduzido na fornalha através de 2 secções distintas (direcionadas para as respetivas entradas de ar), ligadas a um ventilador centrífugo. Analogamente à injeção de ar primário, a regulação/controlo dos caudais de ar secundário/terciário é realizada com recurso a válvulas borboleta ligadas a servomotores. A Figura 4.5 apresenta os ventiladores utilizados pela empresa para a introdução de ar primário e secundário/terciário.



Figura 4.5. Ventilador de introdução de ar primário (à esquerda) e de ar secundário/terciário (à direita).

4.2.4 *SISTEMA DE TRATAMENTO DO EFLUENTE GASOSO*

Os gases de exaustão contêm Material Particulado, denominado cinza volante, que deve ser removido do efluente gasoso, com o intuito de minimizar o impacto ambiental associado ao processo de combustão. Desta forma, os gases de combustão, depois de aquecerem a água, são encaminhados para um multiciclone⁶ (Figura 4.6).



Figura 4.6. Multiciclone.

⁶ O multiciclone é constituído por quatro ciclones.

O ciclone, equipamento constituído por um corpo cilíndrico e uma base cónica, é um sistema de separação mecânica (gás-sólido) onde é introduzido um campo de forças sobre as partículas que, por ação da inércia e da massa destas, as faz desviar da trajetória do gás que as arrasta para locais fora da ação do escoamento gasoso, a partir de onde podem ser removidas (Antunes & Matos, 2007).

Os ciclones presentes na Ventil de são entrada espiral ou axial e de fluxo invertido, com uma abertura inferior para a descarga de partículas recolhidas e uma abertura superior para a saída do efluente limpo. As partículas removidas pelos ciclones são direcionadas para a tremonha do multiciclone e, de seguida, para um balde de recolha de cinzas. Este balde deve ser esvaziado periodicamente para evitar a acumulação de cinzas na tremonha e a sua reintrodução no efluente emitido pela chaminé (Ventil, 2015).

4.2.5 EXTRAÇÃO DOS GASES DE COMBUSTÃO

A caldeira em estudo foi desenvolvida com o intuito de favorecer uma combustão em depressão, tendo em vista dois objetivos principais (Ventil, 2015):

- Evitar o risco de retorno de chama na eventualidade da porta principal ser aberta durante o funcionamento da caldeira ou por variações pontuais de pressão no interior da câmara de combustão;
- Permitir a extração dos gases de combustão.

A depressão advém da ação do ventilador de extração dos gases de combustão (Figura 4.7) (modelo GR450 com potência nominal de 5,5 kW, instalado a jusante do multiciclone), sendo controlada pelo ajuste automático da válvula de borboleta, instalada a montante deste ventilador. Esta válvula liga a caldeira à chaminé, abrindo e fechando de forma modulante, o que possibilita uma depressão constante no interior da caldeira.

O ventilador de extração permite a remoção dos gases de combustão, possibilitando a emissão destes para a atmosfera e funcionando como um sistema de segurança. No momento em que a instalação cessa o seu funcionamento, a válvula abre totalmente, permitindo uma tiragem natural e uma depressão mínima na fornalha (Ventil, 2015).



Figura 4.7. Ventilador de extração dos gases de exaustão.
Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2015).

4.2.6 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO

A monitorização e controlo da caldeira acontece num laboratório industrial, presente na empresa, que integra, para além do sistema da caldeira, uma central de aquisição, monitorização, controlo e tratamento de dados dos diversos componentes da caldeira, e um sistema de controlo automático (quadro elétrico), detentor de HMI (*Human Machine Interface*), ou seja, uma consola gráfica de introdução e visualização de parâmetros e/ou dados (Figura 4.8). Este sistema permite ao operador observar os dados da caldeira e ajustar os parâmetros do processo, nomeadamente o ciclo de trabalho dos cilindros hidráulicos que permitem a movimentação das grelhas, o nível de abertura das válvulas de ar primário (nas três zonas), secundário e terciário, a temperatura de saída da água da caldeira, o funcionamento dos ventiladores de introdução primário, secundário e de extração de gases, teor de oxigénio no efluente, depressão na fornalha, entre outros.



Figura 4.8. Quadro elétrico da caldeira.

O processo de combustão é gerido automaticamente (por controladores PID) através de um algoritmo que controla a introdução de combustível e ar na fornalha, em função do intervalo estabelecido para o O_2 (gás húmido medido por uma sonda *lambda* – Figura 4.9) nos gases de combustão ($Y_{O_2, \min}$ e $Y_{O_2, \text{desejado}}$), temperatura máxima da água de saída da caldeira ($T_{H_2O, \text{out}}$) e pelo diferencial de temperatura máxima permitido na água (ΔT_{H_2O}). Se a percentagem de O_2 desejada estiver acima do valor imposto, o sistema corrige a entrada de ar e/ou combustível na fornalha. Por outro lado, se a percentagem de O_2 for inferior ao valor mínimo, o sistema interrompe a alimentação até que seja compensado o défice de Oxigénio. É importante referir que o sistema da caldeira entra numa fase de repouso/paragem quando a água atinge a temperatura desejada (definida pelo operador) à saída do permutador horizontal, retomando a operação quando for atingido o diferencial de temperatura adotado.

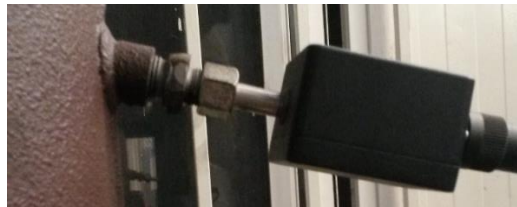


Figura 4.9. Sonda *lambda* para medição do teor de oxigénio húmido no efluente gasoso.

4.2.6.1 MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA

A medição de temperatura na caldeira é feita com recurso a termopares do tipo N (Figura 4.10), constituídos por duas ligas metálicas condutoras: Nitrosil (liga metálica com Níquel, Silício e Crómio - positiva) e Nisil (liga metálica com Níquel, Silício e Magnésio - negativa). Estes apresentam uma gama de temperatura elevada (0 – 1100 °C, para medição em contínuo e -270 – 1300°C, para prazos de medição curtos), característica do processo de combustão. Esta opção, neste tipo de sistemas, favorece a estabilidade termoelétrica, permite uma maior precisão e não se degrada com facilidade, apresentando uma boa resistência à oxidação (FFonseca, 2015).



Figura 4.10. Termopar tipo N.

4.2.6.2 MONITORIZAÇÃO DA PRESSÃO

O diferencial de pressão no interior da conduta de saída de gases de exaustão é medido através de um transmissor de pressão diferencial da *Jumo Instrument Co. Ltd*, operando na seguinte gama: -25 a 25 mbar. Por outro lado, o diferencial de pressão no interior da conduta de introdução de ar é medido por um transmissor de pressão diferencial Testo 512, que opera numa gama de 0 a 2 hPa. Analogamente ao equipamento anterior, este transmissor também está acoplado ao tubo de *Pitot*. A Figura 4.11 apresenta o transmissor de pressão diferencial da *Jumo Instrument Co. Ltd* (lado esquerdo) e o transmissor de pressão diferencial Testo 512 (lado direito). Estes medidores estão ligados a um tubo de *Pitot* (Figura 4.12), instrumento que permite determinar a diferença entre a pressão total e a pressão estática do escoamento.

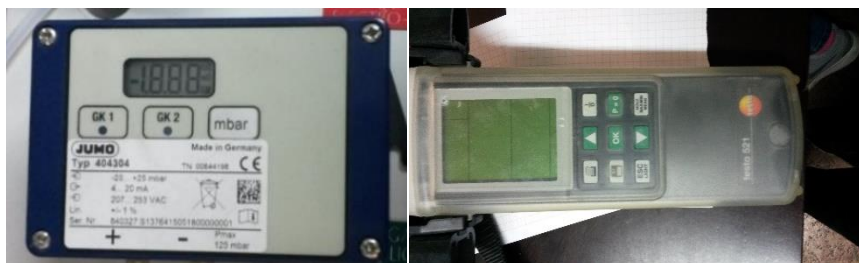


Figura 4.11. Transmissor de pressão diferencial *Jumo Instrument Co. Ltd* (à esquerda) e o transmissor de pressão diferencial Testo 512 (à direita).



Figura 4.12. Tubo de *Pitot*.

O diferencial de pressão obtido pelo tubo de *Pitot* possibilita a determinação da velocidade do escoamento, tendo por base a equação de *Bernoulli* (equação 1) (Antunes & Matos, 2007).

$$v = k_p \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_G}} \quad (1)$$

Onde:

- $v \rightarrow$ Velocidade do escoamento [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];

- $k_p \rightarrow$ Fator de correção do tubo de *Pitot* [-]⁷;
- $\Delta p \rightarrow$ Diferença entre a pressão total e a pressão estática [Pa];
- $\rho_G \rightarrow$ Massa volúmica do fluido gasoso [kg·m⁻³].

Assim, determinando a velocidade do escoamento e conhecendo a área da secção por onde o fluido se desloca, é possível determinar o caudal de ar ou efluente gasoso (equação 2).

$$\dot{V}_{escoamento} = v \times A \quad (2)$$

Onde:

- $\dot{V}_{escoamento} \rightarrow$ Caudal volumétrico de escoamento [m³·s⁻¹];
- $A \rightarrow$ Área da secção transversal [m²].

A Tabela 4.3 apresenta as dimensões das condutas de introdução de ar e o diâmetro da conduta da chaminé.

Tabela 4.3. Dimensões das condutas.

	Altura [m]	Largura [m]	Diâmetro interno [m]
Secção 1	0,072	0,158	-----
Secção 2	0,074		-----
Secção 3	0,074		-----
Secção de passagem do ar secundário/terciário	0,166	0,231	-----
Conduta da chaminé	-----	-----	0,244

A depressão na fornalha é medida na primeira câmara de combustão, recorrendo a um transmissor de pressão diferencial: *Kimo Instruments*, série CP110, modelo CP113 (Figura 4.13), que opera entre -100 mbar e 100mbar. O valor registado pelo transmissor apresenta o diferencial de pressão entre o interior da fornalha e o ambiente exterior à mesma.

⁷ ($\cong 0.98$ a 1 para um tubo com configuração normalizada) [adimensional]. Para os cálculos realizados será usado o fator de correção $k_p = 1$.



Figura 4.13. Transmissor de pressão diferencial da *Kimo Instruments*.

4.2.6.3 MONITORIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE GASOSO

Por forma a avaliar o desempenho ambiental do processo de combustão, é essencial conhecer a composição dos gases à saída da caldeira. Deste modo, a recolha de uma amostra de efluente gasoso é realizada por uma sonda de amostragem (Figura 4.14), e a leitura da composição dessa amostra é concretizada pelo sistema de análise (Figura 4.15), que integra um condicionador de gases (M&C®, série CSS) e um analisador de gases (ABB, série EL300 e modelo EL3040).



Figura 4.14. Sonda de amostragem de gases.



Figura 4.15. Condicionador de gases (à esquerda) e analisador de gases (à direita).

Uma vez que o analisador de gases avalia a composição de gás seco sem Material Particulado, a sonda de amostragem incorpora, no seu interior, lâ-de-rocha, com o intuito de reter grande parte das partículas presentes na amostra de efluente. Por outro lado, o condicionador é responsável pela remoção de condensados (recorrendo a um copo de condensados que retém os condensados após o arrefecimento do gás) e pela remoção da fração de partículas que não tenha ficado retida na lâ-de-

rocha (através de um filtro) da amostra recolhida pela sonda. Quando a amostra estiver pronta para o analisador de gases, são determinadas as concentrações de CO₂, CO e NO através de um sensor *Uras26*, onde a medição dos diferentes compostos é realizada de forma seletiva por aplicação da tecnologia de infravermelho não dispersivo – NDIR (*Non-Dispersive Infra-Red*), e de O₂ com recurso a um sensor *Magnos206*, que emprega métodos paramagnéticos. A Tabela 4.4 apresenta as gamas de medição do analisador para os diferentes gases passíveis de serem avaliados.

Tabela 4.4. Gama de leitura do analisador para os vários gases.

Gás	Gama de medição	Unidades
CO ₂	0-25	% volúmica
CO	0-10000	ppmv
NO	0-2000	ppmv
O ₂	0-25	% volúmica

4.2.6.4 MONITORIZAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE NO EFLUENTE GASOSO

O teor de humidade nos gases de exaustão é medido através de um transmissor de humidade relativa e temperatura: VAISALA HUMICAP®, modelo HMT310 com sonda HMT310 (Figura 4.16). A monitorização do teor de humidade com este equipamento é viável para efluentes gasosos com temperaturas inferiores a 180 °C.



Figura 4.16. Transmissor VAISALA HUMICAP®, modelo HMT310 (à esquerda) com sensor HMT315 (à direita).

Assim, sabendo a humidade relativa (U_w) e a temperatura do efluente gasoso (T_U), é possível, através da equação 3, determinar a fração molar de vapor do mesmo efluente (gás húmido) (Matos, 2015).

$$y_v = \frac{p_{vs}(@T_U) \times U_w}{P_{atm}} \quad (3)$$

Onde:

- $y_v \rightarrow$ Fração molar de vapor [$\text{kmol vapor} \cdot \text{kmol}^{-1}$ gás húmido];

- $p_{vs}(@T_U) \rightarrow$ Pressão de vapor de saturação [Pa] à temperatura do efluente gasoso, T_U [K];
- $U_w \rightarrow$ Humidade relativa [adimensional];
- $P_{atm} \rightarrow$ Pressão atmosférica⁸ [Pa].

A pressão de vapor de saturação é determinada através da regressão linear⁹ apresentada na equação 4, para os coeficientes presentes na Tabela 4.5 (Matos, 2015).

$$p_{vs}(@T) = a_0 + a_1 T + \frac{a_2}{T} + a_3 T^2 + a_4 T^3, T[K] \quad (4)$$

Tabela 4.5. Coeficientes da regressão linear utilizada para a determinação da pressão de vapor de saturação¹⁰.

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	Gama de Temperatura [K]
22,51156	-0,02029054	-6333,5	$1,587325 \times 10^{-5}$	$-3,161718 \times 10^{-9}$	273-625

Fonte: Matos (2015).

4.2.6.5 MONITORIZAÇÃO DO CAUDAL DE ÁGUA

O caudal de água na caldeira é monitorizado através de Sonometers™ 1100 da *Danfoss*, sistemas estáticos e compactos de ultrassons, utilizados para a medição com aplicações de aquecimento e/ou de arrefecimento (Figura 4.17). O sistema apresenta dois medidores, um deles aplicado na rede de água para aquecimento do complexo industrial, apresentando uma gama de medição que varia entre 60 e 120 m³·h⁻¹. O segundo medidor é aplicado na rede de distribuição de água de dissipação de energia para a atmosfera, operando na seguinte gama de medição: 25 e 50 m³·h⁻¹. O aparelho de medição integra um sensor de caudal ultrassónico, um sistema de cálculo para medição de caudais, temperatura e consumos energéticos, e sondas de temperatura.



Figura 4.17. Medidor de caudal de água: Sonometers™ 1100 *Danfoss*.

⁸ $P_{atm} = 101300 \text{ Pa}$

⁹ Nesta regressão linear, a $p_{vs}(@T)$ é dada em bar, devendo ser alterada para Pascal para cumprir os requisitos da equação 4: 1 bar = 10⁵ Pa.

¹⁰ O coeficiente de correlação (r^2) da regressão linear apresentada é 0,999999, o que se traduz numa boa correlação entre os dados.

5 ANÁLISE DE PARÂMETROS DA CALDEIRA

Neste Capítulo é exposta a metodologia utilizada para a monitorização das condições de operação da fornalha apresentada, bem com os resultados e as conclusões associadas à análise dos parâmetros em estudo. A realização deste trabalho tem por base a avaliação de três parâmetros distintos¹¹:

- Distribuição do ar primário na fornalha;
- Excesso de ar;
- Movimentação das grelhas.

A análise do segundo parâmetro é realizada tendo por base a condição mais adequada do primeiro parâmetro, ou seja, a variação de caudal de ar primário nas três secções para a qual se obtiveram menores valores de emissão de CO. A avaliação do terceiro parâmetro tem por base o ponto de operação mais adequado, considerando o conjunto dos dois primeiros parâmetros. Desta forma, para a exposição do procedimento experimental, apresentação de resultados e respetiva discussão/conclusão, optou-se por dividir a análise dos parâmetros em três subsecções, com o intuito de facilitar a compreensão da influência de cada um dos parâmetros no processo.

Uma vez encontrado o ponto de operação mais adequado, considerando a conjugação das três variáveis para as condições testadas, é apresentada uma Subsecção onde exposto o comportamento da caldeira para esse ensaio.

5.1 PARÂMETROS

5.1.1 DISTRIBUIÇÃO DE AR PRIMÁRIO

5.1.1.1 MÉTODOS

Calibração do sem-fim de alimentação

Por forma a determinar o caudal de biomassa admitido na fornalha, foi necessário realizar uma calibração do sistema de alimentação da caldeira. A calibração foi realizada relacionando a relação de frequência de funcionamento do equipamento [%]¹² com a massa de combustível que atravessa o

¹¹ Ver secção 1.2.

¹² A relação de frequência de funcionamento é dada em % (0 – 100). Sabendo que a frequência de funcionamento do sem-fim varia entre 0 e 60 Hz, 100 % de relação de frequência corresponde a 60 Hz.

sem-fim num dado período de tempo. A frequência de funcionamento do moto-reductor do sistema é controlada pelo quadro elétrico da caldeira e vai variar entre 2 e 32 %. Assim, a reta de calibração do sem-fim de alimentação apresentará uma fórmula semelhante à equação 5. Através desta equação, é possível determinar o caudal de biomassa que entra na fornalha, conhecendo apenas a frequência de funcionamento do sistema de alimentação.

$$\dot{m}_{biomassa} = m \times f + b \quad (5)$$

Onde:

- $\dot{m}_{biomassa} \rightarrow$ Caudal mássico de biomassa [$\text{kg B} \cdot \text{h}^{-1}$];
- $m \rightarrow$ Declive da reta;
- $f \rightarrow$ Frequência de funcionamento do sem-fim de alimentação [%];
- $b \rightarrow$ Ordenada na origem

Montagem dos equipamentos de medição

A medição dos diversos parâmetros da caldeira é imprescindível para o bom funcionamento do sistema. Assim, a caldeira em estudo integra diferentes aparelhos de medida em vários pontos do sistema. A Figura 5.1 apresenta o esquema da caldeira com os vários pontos de medição e os respetivos equipamentos de medida, de onde se destacam:

- Termopar 1 - Temperatura dos gases na câmara de combustão secundária [$^{\circ}\text{C}$];
- Termopar 2 – Temperatura dos gases no permutador horizontal [$^{\circ}\text{C}$];
- Termopar 3 – Temperatura dos gases na ligação entre permutadores [$^{\circ}\text{C}$];
- Termopar 4 – Temperatura dos gases depois do permutador vertical [$^{\circ}\text{C}$];
- Termopar 5 – Temperatura dos gases antes do multiciclone [$^{\circ}\text{C}$];
- Sonda de amostragem – recolhe o gás para o analisador determinar a concentração de CO_2 [% volúmica, gás seco], CO [ppmv, gás seco], NO [ppmv, gás seco] e O_2 [% volúmica, gás seco];
- Sonda de medição de Humidade – Permite determinar a Humidade Relativa [%] e a temperatura do efluente gasoso [$^{\circ}\text{C}$];
- Sonda *lambda* – Permite determinar o teor de Oxigénio húmido no efluente gasoso [% volúmica, gás húmido]
- Toma de medição com *Pitot* – Diferencial de pressão na conduta da chaminé [mbar].

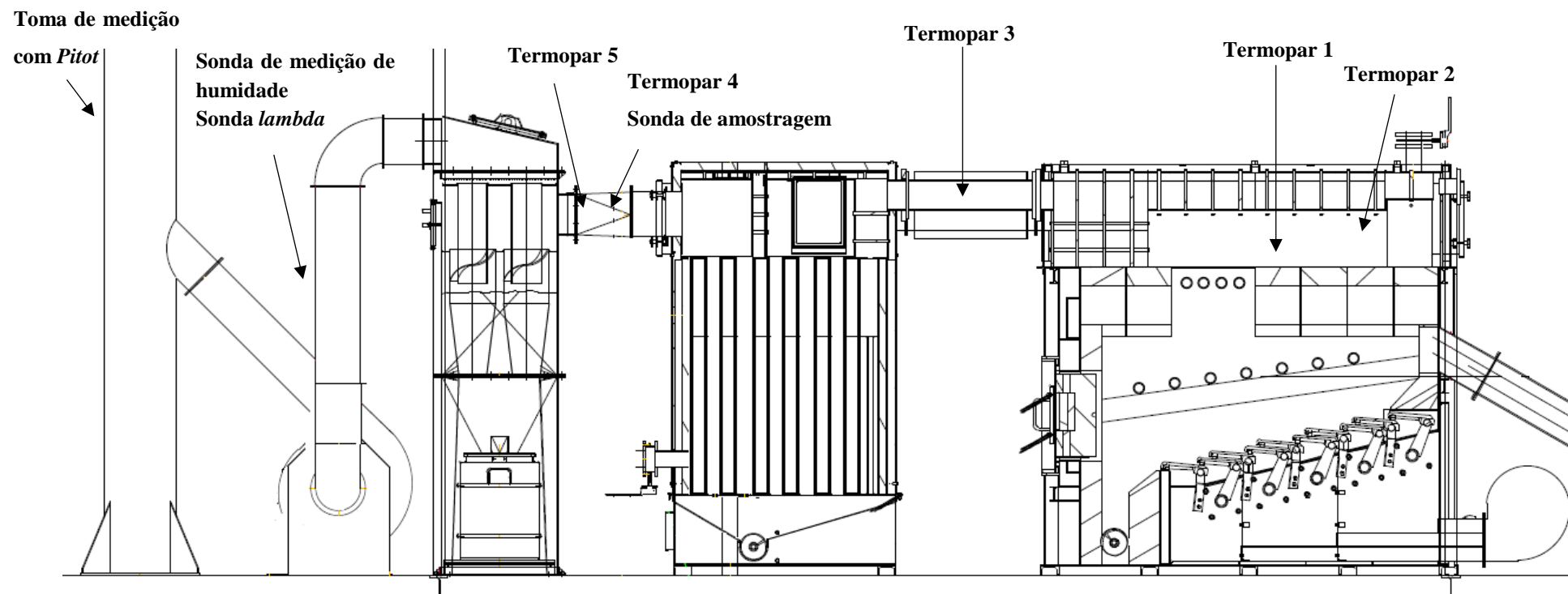


Figura 5.1. Esquema de montagem dos equipamentos de medição.
 Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2017) (adaptado).

Movimentação das grelhas

Como referido na Subsecção 3.1.2.1 por Van Loo & Koppejan (2008), é importante ajustar os parâmetros de movimentação das grelhas, com o intuito de promover uma combustão eficiente do ponto de vista energético e ambiental. Considerando a velocidade de movimentação das grelhas automática, é necessário impor três variáveis no sistema:

- Ciclo de trabalho – tempo necessário para a movimentação de cada grelha, incluindo o período de trabalho e de descanso das grelhas;
- Trabalho – tempo durante o qual ocorre a movimentação das grelhas propriamente dita;
- Paragem para inversão – uma vez que a tipologia de grelhas apresenta um movimento de avanços e recuos, é necessário estabelecer um tempo para alterar a deslocação destas (de avanço para recuo ou vice-versa).

Considerando as diferentes fases do processo de combustão condicionadas pela movimentação das grelhas: secagem, combustão do resíduo carbonoso/formação de cinzas, é essencial compreender o tempo requerido para cada uma das etapas.

O tempo de secagem depende do teor de humidade do combustível, sendo o ciclo de trabalho mais longo quanto maior for o teor de humidade do material a queimar. A combustão do resíduo carbonoso, como referido por Dahlquist (2013), consiste numa reação heterogénea lenta, devendo o ciclo de trabalho associado a esta fase ser mais longo. A formação de cinzas é a etapa onde é finalizada a combustão do material que não foi totalmente queimado, com consequente formação de um resíduo inerte, pronto para ser eliminado. Assim, esta fase requer um ciclo de trabalho bastante longo, de forma a permitir um tempo de residência elevado do material inqueimado no leito de combustão.

Desta forma, a secção (1) diz respeito à fase de aquecimento e secagem da biomassa, na secção (2) dá-se a combustão do resíduo carbonoso e a secção (3) é responsável pela continuação do processo de oxidação do carbonizado com consequente formação de cinzas. A Tabela 5.1 apresenta a movimentação escolhida, tendo em consideração as necessidades de cada fase, as propriedades do biocombustível e a correspondência das diversas etapas às três secções.

Tabela 5.1. Parametrização do *software* de controlo da movimentação das grelhas.

	Secção (1)	Secção (2)	Secção (3)
Ciclo de trabalho [s]	20	40	90
Trabalho [s]	2	5	5
Paragem para inversão [s]	8	10	10

A título elucidativo, a Figura 5.2 apresenta um conjunto de imagens ilustrativas da distribuição do material no leito de combustão, através da movimentação das grelhas.

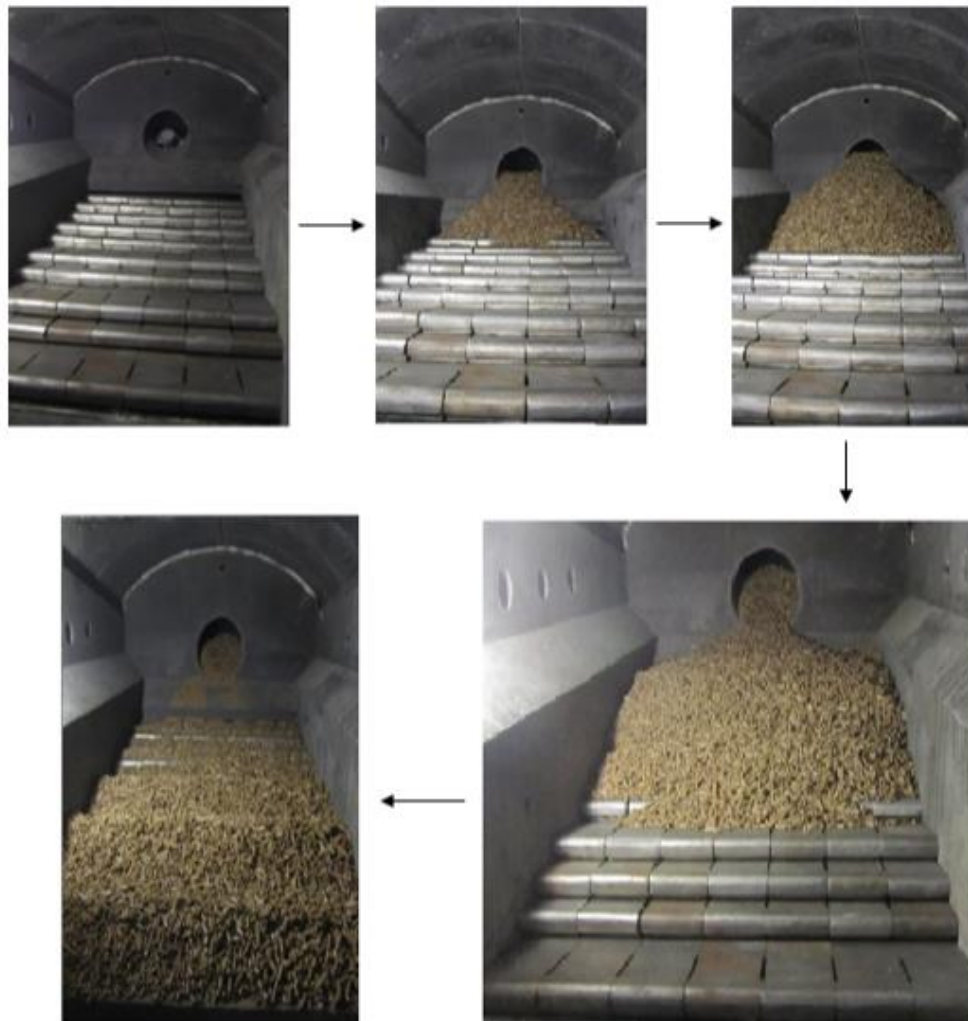


Figura 5.2. Distribuição de *pellets* de madeira no leito de combustão (grelhas *reciprocating*).
Fonte: Cortesia da Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda. (2017).

Distribuição do ar primário na fornalha

No Capítulo 4 foi exposta a geometria da fornalha, onde são apresentadas as três zonas de introdução de ar primário para a combustão. Um dos objetivos deste trabalho passa pela análise da percentagem de ar primário em cada uma dessas zonas, através da variação da abertura da válvula de borboleta para as várias secções de introdução de ar primário ($A_{v,1^{\circ},s}$). Assim, foram realizados ensaios de 30 minutos, nos quais se fez variar a percentagem de ar numa das secções da fornalha (estabelecida na forma de parametrização de abertura da válvula de borboleta de admissão de ar primário a cada uma das secções, e expressa em % de abertura) mantendo as restantes constantes, iniciando-se com as seguintes percentagens de abertura da válvula de borboleta:

- $A_{v,1^\circ,1}$ - 50 %
- $A_{v,1^\circ,2}$ - 70 %
- $A_{v,1^\circ,3}$ - 40 %

A primeira secção a ser alterada é a segunda por uma questão de facilidade de análise, visto que é a que está mais próxima de um dos limites de amostragem (100 %). Uma vez encontrado o ponto de operação mais adequado para esta secção (valores mínimos de CO e nível de emissão de NO reduzido), seguem-se as secções seguintes, até se encontrar a condição de operação mais adequada para este parâmetro¹³.

De acordo com Yin *et al.* (2008), a repartição de ar primário/secundário ideal para sistema de combustão modernos é 40/60. No entanto, para os ensaios apresentados, foi utilizada uma repartição de ar primário/secundário/terciário de 60/30/10, uma vez que o ar primário, para além de ser responsável pela distribuição de ar no processo de combustão (para a secagem da biomassa, desvolatilização e combustão do resíduo carbonoso), tem como finalidade arrefecer as grelhas com o intuito de evitar a degradação das mesmas. Para além disso, a introdução de ar secundário/terciário deve ser condicionada, uma vez que a presença de ar em excesso na câmara de combustão pode potenciar a formação de poluentes, tais como NO. Considerando os ensaios apresentados, a Tabela 5.2 exhibe os parâmetros operacionais da fornalha/caldeira, nomeadamente:

- Temperatura da água de saída do sistema (T_{H_2O} , desejada);
- Diferencial máximo de temperatura da água (ΔT_{H_2O});
- Depressão na caldeira ($\Delta P_{caldeira}$);
- O teor de oxigénio no efluente gasoso (mínimo e desejado) ($Y_{O_2, \min}$ e $Y_{O_2, \text{desejado}}$);
- Frequência de funcionamento do moto-redutor do ventilador de exaustão (mínima e máxima) ($fV_{e, \min}$ e $fV_{e, \max}$)¹⁴;

¹³ Para os ensaios efetuados, o excesso de ar imposto na caldeira é de 100% ($\lambda = 2$). Este valor baseia-se no estudo apresentado na subsecção “3.1.1 Otimização do processo de combustão”, onde são apresentadas as gamas de valores para a razão de excesso de ar em sistemas de pequena escala e de grande escala. Uma vez que a caldeira em estudo se integra na categoria de média escala, optou-se por usar um valor médio entre os dois intervalos de valores enunciados.

¹⁴ A frequência de funcionamento do ventilador de extração de gases está relacionada com a potência nominal do equipamento. Ou seja, a potência máxima do equipamento corresponde a 100% da frequência de funcionamento.

- Frequência de funcionamento do moto-redutor do ventilador de introdução de ar primário (mínima e máxima) ($fV_{i-p, \min}$ e $fV_{i-p, \max}$)¹⁵;
- Frequência de funcionamento do ventilador de introdução de ar secundário (mínima e máxima) ($fV_{i-s, \min}$ e $fV_{i-s, \max}$);
- Frequência de funcionamento do moto-redutor do sem-fim (mínima e máxima) ($fM_{s-f, \min}$ e $fM_{s-f, \max}$).

Tabela 5.2. Parâmetros operacionais da fornalha/caldeira.

Parâmetro	Valor
$T_{H_2O, desejada}$ [°C]	99
ΔT_{H_2O} [°C]	1
$\Delta P_{caldeira}$ [mbar]	1
$Y_{O_2, \min}$ [% volúmica]	6,7
$Y_{O_2, desejada}$ [% volúmica]	10
$fV_{e, \min}$ [%]	30
$fV_{e, \max}$ [%]	100
$fV_{i-p, \min}$ [%]	20
$fV_{i-p, \max}$ [%]	40
$fV_{i-s, \min}$ [%]	20
$fV_{i-s, \max}$ [%]	30
$fM_{s-f, \min}$ [%]	2
$fM_{s-f, \max}$ [%]	25

5.1.1.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do sem-fim

A calibração do sistema de alimentação resultou na equação 6, permitindo assim a relação entre o caudal de biomassa admitido na fornalha com a frequência de funcionamento do moto-redutor. A Figura 5.3 apresenta a curva obtida durante a operação de calibração.

$$\dot{m}_{biomassa} \left[\frac{kg}{h} \right] = 3,46 \times f[\%] + 43,54 \quad (6)$$

¹⁵ A frequência de funcionamento dos ventiladores de introdução de ar primário/secundário está relacionada com o número de rotações por minuto do equipamento. Ou seja, o número máximo de rotações por minuto do equipamento corresponde a 100% da frequência de funcionamento.

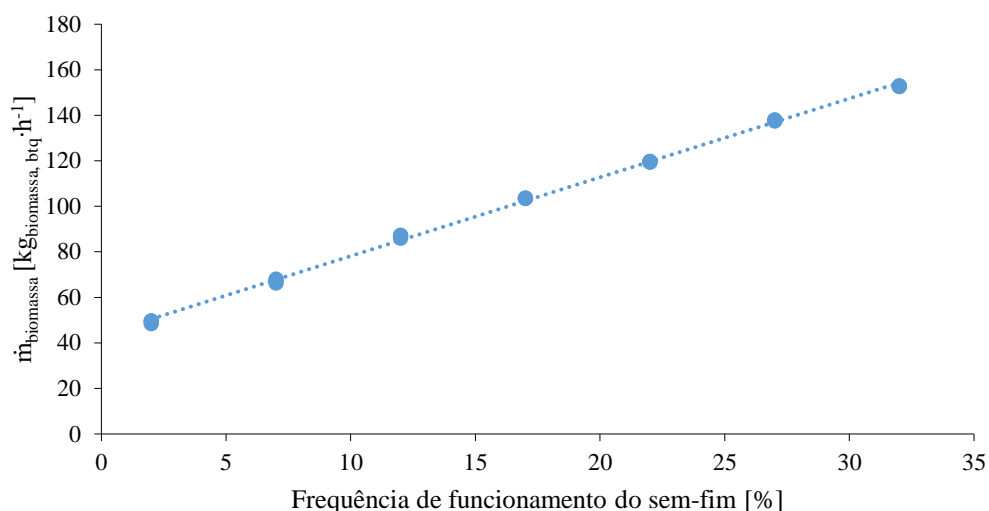


Figura 5.3. Curva de calibração do sem-fim de alimentação.

Efeito da distribuição de ar primário na fornalha

O excesso de ar utilizado para os ensaios referentes à influência da distribuição de ar primário foi de 100 %, o que se traduz num teor de Oxigénio desejado de 10 % volúmica, gás húmido. A análise do parâmetro supracitado tem por base o teor de CO no efluente gasoso. Como o CO é o composto intermédio da combustão que está relacionado com a eficiência do processo, a avaliação do efeito da variação da distribuição de ar primário nas secções da grelha será realizada tendo em consideração o valor médio obtido para este poluente. Assim, dos 28 ensaios realizados, foram escolhidos 3 para análise (Tabela 5.3), onde as diferentes cores estão relacionadas com a avaliação de cada um dos ensaios.

Tabela 5.3. Caracterização dos ensaios escolhidos e parametrização no *software* da fornalha/caldeira da abertura das válvulas de borboleta para distribuição do ar primário.

Ensaio	Avaliação do ensaio	Abertura da válvula de borboleta [%]		
		Secção (1)	Secção (2)	Secção (3)
A	●	50	100	10
B	●	10	100	10
C	●	50	100	90

Onde:



Ensaio onde se obtiveram melhores resultados sob ponto de vista de emissão de CO;



Ensaio onde se obtiveram resultados intermédios sob ponto de vista de emissão de CO;



Ensaio onde se obtiveram os piores resultados sob ponto de vista de emissão de CO.

A monitorização dos gases de combustão permite analisar o desempenho da fornalha, tornando-se, desta forma, um parâmetro de interesse aquando do estudo de processo de combustão. A Figura 5.4 apresenta a relação entre o CO e NO, em função do teor de O₂ seco presente no efluente gasoso. A Figura 5.5¹⁶ apresenta a relação entre a razão de excesso de ar total/primário e o teor de O₂ seco no efluente gasoso. A Figura 5.6 apresenta os valores relativos ao caudal médio de ar admitido em cada secção das grelhas, para os ensaios A, B e C, e a Tabela 5.4 apresenta os valores médios obtidos para o caudal volumétrico de ar primário e a respetiva repartição do mesmo pelas três secções.

Observando a Figura 5.4, verifica-se que a concentração de CO, para o ensaio C, é superior às dos restantes ensaios. Considerando a abertura das válvulas de borboleta de admissão de ar primário presente na Tabela 5.3, o caudal de ar na segunda secção (zona de combustão) vai ser menor do que no ensaio A, uma vez que a válvula de borboleta ligada ao servomotor da secção 3 está aberta quase na totalidade, permitindo a passagem de mais ar para esta secção (ver Figura 5.6 e Tabela 5.4). Assim, a quantidade de ar primário para a combustão do resíduo carbonoso poderá estar mal distribuída, o que implica uma combustão mais incompleta, comparativamente com os outros ensaios, com consequente aumento da emissão de CO. Por outro lado, a introdução de um maior caudal de ar de combustão na secção 3 poderá levar a um aumento da turbulência, com possível redução do tempo de residência dos gases, o que se traduz num aumento da emissão de CO.

De acordo com Coelho & Costa (2012) e Van Loo & Koppejan (2008) (considerando uma combustão por estágios de ar), no primeiro estágio é introduzida apenas uma parte do ar de combustão, estabelecendo-se uma zona rica em combustível (pobre em Oxigénio); a respetiva razão estequiométrica é referida como estequiometria do primeiro estágio (λ_1). O ar necessário para completar a combustão é introduzido no segundo estágio, onde se estabelece uma zona de combustão pobre em combustível (rica em Oxigénio). Este método permite fasear a combustão (separando a fase de desvolatilização da fase de combustão de voláteis), reduzindo simultaneamente a temperatura e a concentração de O₂ no primeiro estágio, o que permite uma redução na formação de NO (Coelho e Costa, 2012; Van Loo & Koppejan, 2008).

Deste modo, analisando a Figura 5.4, observa-se que a emissão de NO para ensaio B é superior às dos restantes ensaios. Esta situação pode estar associada ao facto da estequiometria do primeiro

¹⁶ A relação presente na Figura 5.5 considera o teor de O₂ seco no efluente gasoso, uma vez que este é medido por métodos paramagnéticos, considerados mais fiáveis do que a sonda *lambda* (responsável pela medição do teor de O₂ húmido). O valor dado pela sonda *lambda* serve apenas como indicador, devendo esta ser calibrada consoante o excesso de ar que se pretende na fornalha. Desta forma, o teor de O₂ húmido será apenas para análise comportamental em relação ao funcionamento de outros equipamentos.

estágio ser superior, comparativamente com o ensaio A e C, o que pode fomentar a produção de NO. Por outro lado, a movimentação das grelhas, juntamente com o excesso de escoamento de ar primário na segunda secção, pode levar ao arrastamento de material combustível da grelha para o segundo estágio, o que leva ao aumento de emissão de NO observado.

Pode ainda observar-se, pela análise da Figura 5.5, que há uma discrepância entre os valores de razão de excesso de ar imposto no software e teor O_2 . Este facto está relacionado com o sistema de controlo e operação automático da fornalha e deve ser otimização e trabalhos futuros.

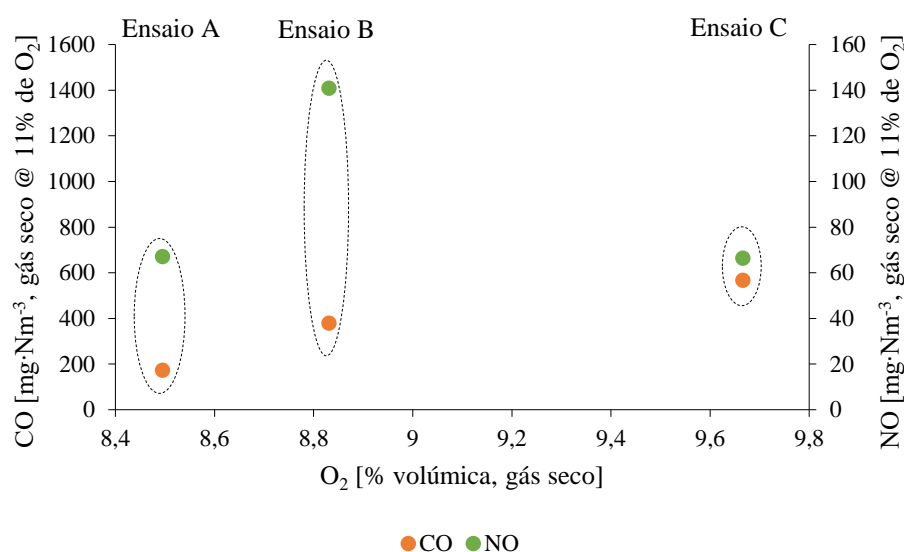


Figura 5.4. Emissões de CO e NO para os ensaios A, B e C, em função do teor de O_2 seco medido no efluente gasoso.

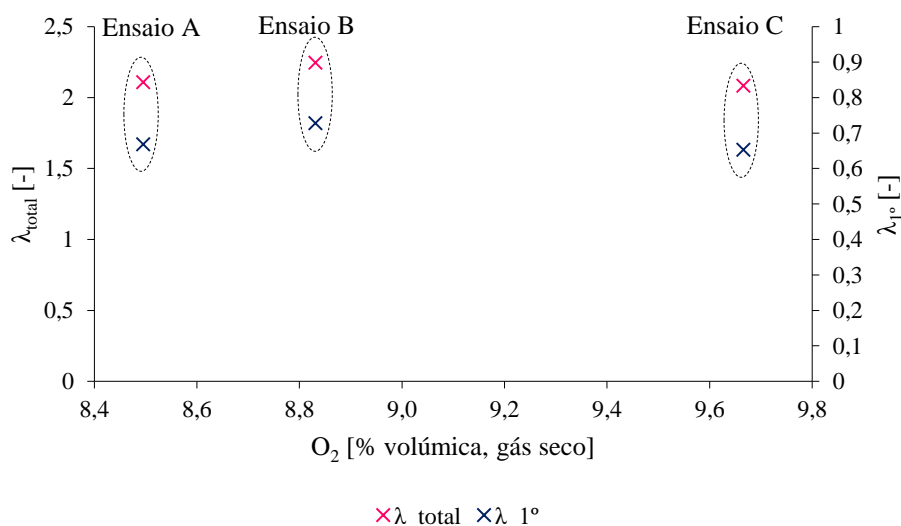


Figura 5.5. Razão de excesso de ar total e estequiometria do primeiro estágio obtidas para os ensaios A, B e C, em função do teor de O_2 seco no efluente gasoso.

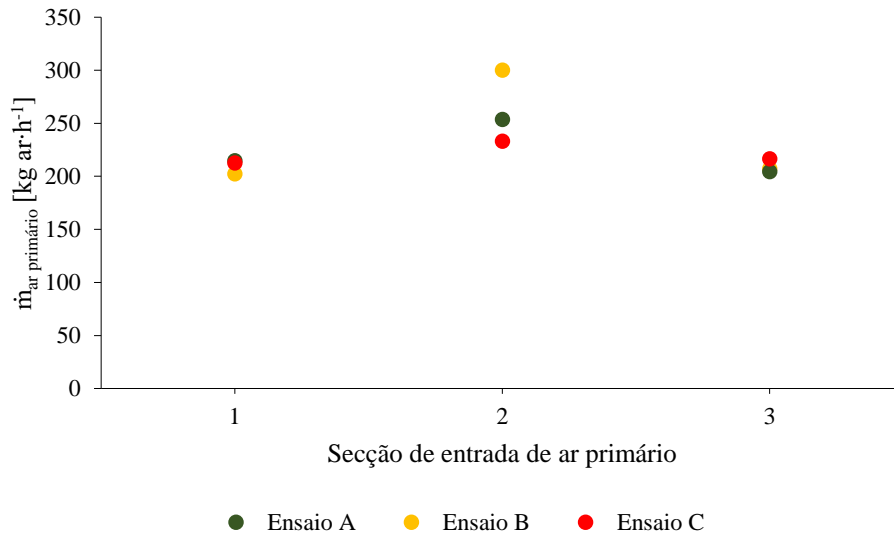


Figura 5.6. Caudal mássico de ar primário nas três secções, para os ensaios A, B e C.

Tabela 5.4. Caudal volumétrico de ar primário para cada secção, para os ensaios A, B e C.

Secção	$\dot{V}_{ar\ primário}$ [Nm ³ ·h ⁻¹]			Repartição de ar [%]		
	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C
1	173,79	163,64	171,96	31,91	28,52	32,10
2	205,28	242,73	188,66	37,70	42,30	35,22
3	165,48	167,45	175,02	30,39	29,18	32,68

Através da Figura 5.6 e da Tabela 5.4 observa-se que, para que a combustão seja eficiente, é necessário que o caudal de ar na segunda secção superior ao caudal introduzido nas restantes secções, uma vez que a combustão do *char* se dá, maioritariamente, na segunda secção.

A temperatura é um parâmetro de extrema importância no processo de combustão. Desta forma, a Figura 5.7 apresenta os valores médios de temperatura nos diferentes termopares de monitorização da temperatura na fornalha/caldeira (ver Figura 5.1). Verifica-se que a temperatura na câmara de combustão secundária (Termopar 1), varia entre 800 °C e 900 °C, gama de temperatura adequada para uma combustão completa (ver Tabela 3.1). É ainda evidenciada a transferência de calor ao longo da caldeira, uma vez que há uma diminuição de temperatura dos gases desde a posição do termopar 2 para o termopar 4, localizado na saída do permutados vertical.

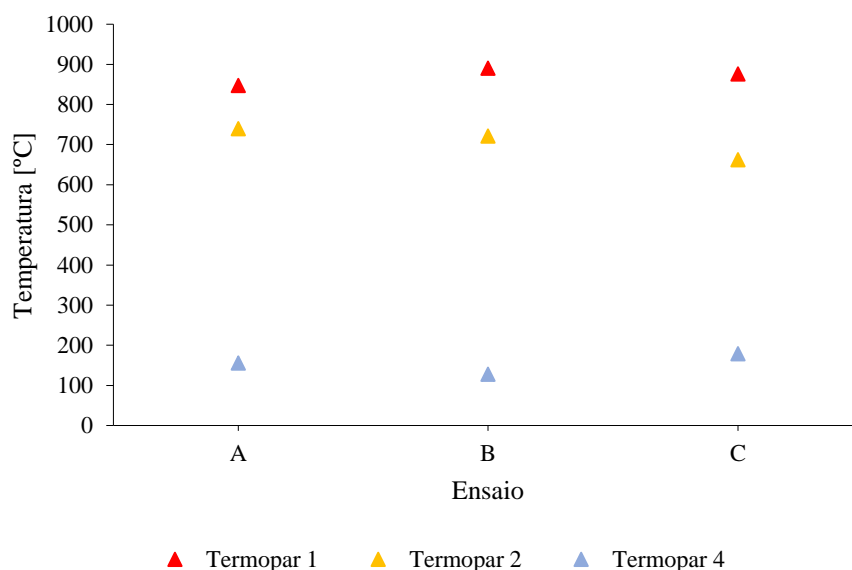


Figura 5.7. Temperaturas médias dos gases de combustão monitorizadas em diferentes localizações, durante as experiências A, B e C.

A Figura 5.8 apresenta os valores médios de caudal de ar total e de biomassa para os ensaios A, B e C. Verifica-se que o sistema de controlo da caldeira atua de forma a ajustar automaticamente o caudal de biomassa introduzido fornalha e o funcionamento dos moto-redutores dos ventiladores de introdução de ar, em função das especificações de estequiometria e potência parametrizadas para o sistema de conversão de energia.

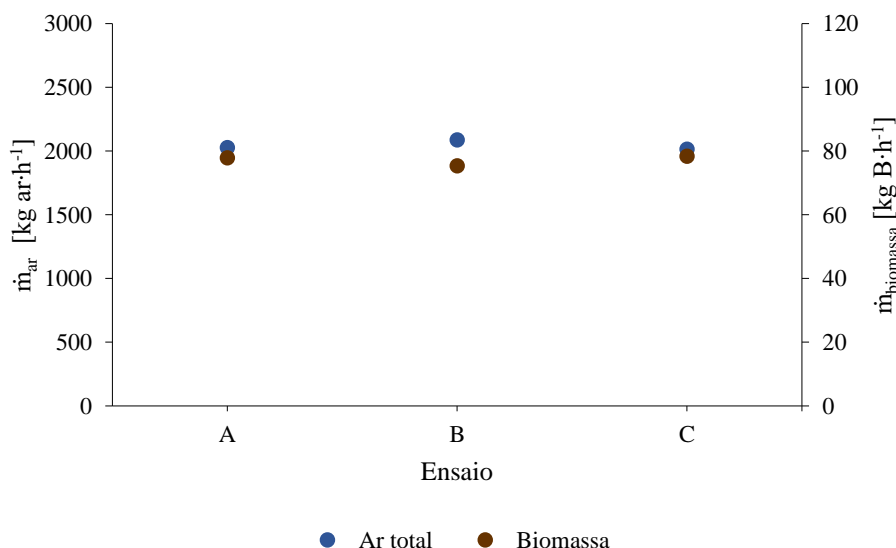


Figura 5.8. Caudais médios mássicos de ar de combustão e de combustível, para os ensaios A, B e C.

A Tabela 5.5 apresenta a composição do efluente gasoso (CO_2 , CO , NO e O_2) para os ensaios A, B e C, bem como a sua comparação com o exigido na Portaria nº677/2009 aplicada a fornalhas/caldeira

de combustão de biomassa. O processo de combustão é eficiente quando a concentração de inqueimados (por exemplo CO) no efluente gasoso é minimizada. Assim, verifica-se que o ensaio A é o mais eficiente, pois apresenta a menor concentração de CO, apesar de ser aquele que se encontra a operar com menor excesso de ar, tal como traduzido pela menor concentração de O₂ nos gases de combustão.

Tabela 5.5. Composição do efluente gasoso e cumprimento da legislação para os ensaios A, B e C^{17,18}.

Ensaio	CO ₂ [% volúmica, gás seco]	CO [mg·Nm ⁻³ , @ 11% de O ₂ gás seco]	NO ¹⁹ [mg·Nm ⁻³ , @ 11% de O ₂ gás seco]	O ₂ [% volúmica, gás seco]	Cumprimento da legislação
A	11,8±1,0	173±114	67±5	8,5±1,1	Conforme
B	11,4±0,6	379±45	141±7	8,8±0,6	Conforme
C	10,7±0,8	567±187	66±3	9,7±0,8	Não conforme

5.1.1.3 CONCLUSÕES

Um dos objetivos deste trabalho passa pela análise da influência da distribuição de ar primário na fornalha. Desta forma, para as condições testadas, foram deduzidas as seguintes conclusões:

- A diminuição do caudal de ar primário na segunda secção e o aumento na terceira pode fomentar a produção de CO;
- A produção adicional de NO no ensaio B pode estar associada a uma estequiometria do primeiro estágio muito elevada e ao possível arrastamento de material combustível da grelha para o segundo estágio, por ação da movimentação das grelhas e excesso de escoamento de ar primário;
- Através da análise realizada, conclui-se que, para que a combustão seja eficiente, é necessário que o caudal de ar na segunda secção seja superior ao caudal de ar nas restantes secções, por forma a assegurar a combustão completa do *char*.

¹⁷ VLE [CO] = 500 mg·Nm⁻³; VLE [NO_x] = 650 mg·Nm⁻³; Oxigénio de referência = 11% (ver Portaria n.º 677/2009);

¹⁸ ± Desvio-padrão.

¹⁹ Expresso em NO₂ para comparação com a legislação aplicada (ver Tabela 3.3)

5.1.2 EXCESSO DE AR

5.1.2.1 MÉTODOS

A metodologia a ser apresentada tem por base as condições de operação mais adequadas, definidas na Subsecção 5.1.1.1, relativas à repartição de ar primário e pretende avaliar o efeito do excesso de ar sobre as condições de operação. O excesso de ar é considerado um parâmetro de controlo importante no processo de combustão, limitando as condições de operação da fornalha/caldeira. Este parâmetro é introduzido no algoritmo de controlo e operação da fornalha, através da imposição dos valores de $Y_{O_2, \min}$ e $Y_{O_2, \text{desejado}}$ nos gases de combustão, tendo por base um balanço mássico teórico ao sistema de combustão. Portanto, o teor de O_2 húmido desejado dita a razão de excesso de ar imposta no sistema.

Considerando a repartição de ar primário por cada secção da grelha mais adequada, determinada na Subsecção 5.1.1.1, realizaram-se dois ensaios adicionais (2 e 3, com duração de 30 minutos cada), onde se fizeram variar os valores de $Y_{O_2, \min}$ e $Y_{O_2, \text{desejado}}$. Na Tabela 5.6 são apresentados os valores usados para esses ensaios.

Tabela 5.6. Variação de O_2 no efluente gasoso.

Ensaio	$Y_{O_2, \min}$ [% volúmica, gás húmido]	$Y_{O_2, \text{desejado}}$ [% volúmica, gás húmido]	Razão de excesso de ar [-]
1 ²⁰	6,7	10	2,00
2	6,7	13	2,85
3	5	6,8	1,50

5.1.2.2 RESULTADOS DE DISCUSSÃO

Analogamente à análise realizada para a distribuição de ar primário na fornalha, a avaliação do efeito do excesso de ar é feita para diferentes parâmetros do sistema. Assim, a Figura 5.9 permite a análise do comportamento do CO e do NO, em função do teor de O_2 no efluente gasoso, para os ensaios 1, 2 e 3.

²⁰ O ensaio 1 é equivalente ao ensaio A analisado para a distribuição de ar primário nas 3 secções da grelha na fornalha.

A Figura 5.10²¹ apresenta a relação entre o excesso de ar total e primário com o teor de O₂ seco no efluente gasoso e a Tabela 5.7 apresenta a razão de excesso de ar teórica e experimental para os diferentes ensaios.

Observando a Figura 5.9, verifica-se que o valor de CO, no efluente gasoso, é superior no ensaio 3, comparativamente ao ensaio 1. Como o excesso de ar é menor para o ensaio 3, em relação ao ensaio 1, uma menor disponibilidade de oxidante condiciona a conversão do combustível e promove a formação de compostos inqueimados, nomeadamente o CO.

Analisando a Figura 5.9, observa-se que, quando o teor de O₂ sobe de 3,50 % volúmica, gás seco, para 8,50 % volúmica, gás seco, a emissão CO tende a diminuir. Por outro lado, quando o teor de O₂ varia entre 8,50 % volúmica, gás seco, e 11,50 % volúmica, gás seco, a emissão de CO tende a subir. Da Figura 5.10 e da Tabela 5.7, verifica-se que há uma disparidade entre os valores teóricos e experimentais para as razões de excesso de ar dos ensaios 2 e 3. Este comportamento reflete a necessidade de um ajuste do sistema de controlo e operação.

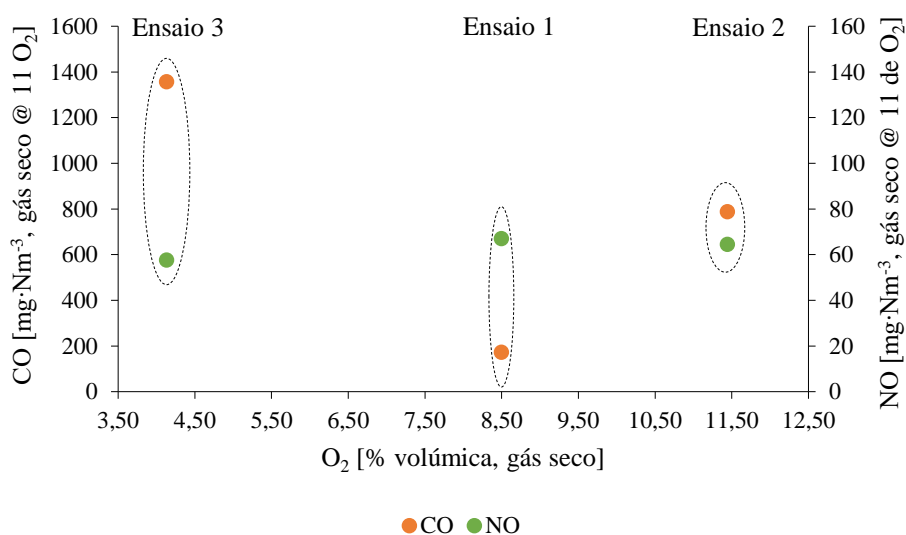


Figura 5.9. Emissões de CO e NO para os ensaios 1, 2 e 3 em função do teor de O₂ seco medido no efluente gasoso.

²¹ A relação presente na Figura 5.10 considera o teor de O₂ seco no efluente gasoso, uma vez que este é medido por métodos paramagnéticos, considerados mais fiáveis do que a sonda *lambda* (responsável pela medição do teor de O₂ húmido). O valor dado pela sonda *lambda* serve apenas como indicador, devendo esta ser calibrada consoante o excesso de ar que se pretende na fornalha. Desta forma, o teor de O₂ húmido será apenas para análise comportamental em relação ao funcionamento de outros equipamentos.

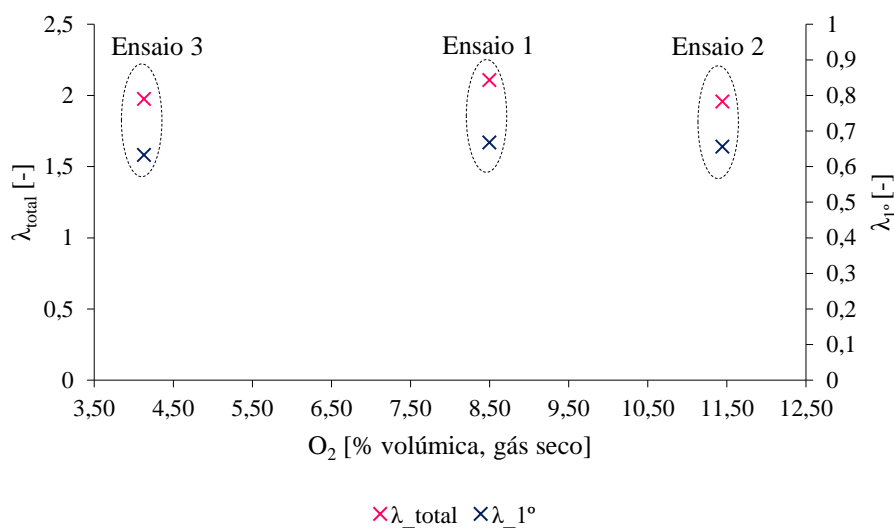


Figura 5.10. Razão de excesso de ar total e estequiometria do primeiro estágio obtidas para os ensaios 1, 2 e 3, em função do teor de O₂ seco no efluente gasoso.

Tabela 5.7. Razão de excesso de ar (teórica e observada experimentalmente) para os ensaios 1, 2, e 3.

Ensaio	$\lambda_{\text{teórico}} [-]^{22}$	$\lambda_{\text{experimental}} [-]^{23}$
1	2,00	2,11
2	2,85	1,96
3	1,50	1,98

A Figura 5.11 apresenta os valores médios de temperatura dos gases de combustão monitorizados em diferentes locais na fornalha/caldeira (ver Figura 5.1). Analisado a Figura 5.11, observa-se que a temperatura medida pelo termopar 2 (entrada no permutador horizontal) é superior à temperatura medida no termopar 1 (câmara de combustão secundária). Esta situação mostra que na experiência 3 a baixa estequiometria no primeiro e no segundo estágio está a promover o arrastamento de material combustível (gases e partículas), que estará a ser oxidado na região de entrada do permutador horizontal (termopar 2).

²² $\lambda_{\text{teórico}}$ é calculado com base no balanço mássico teórico.

²³ $\lambda_{\text{experimental}}$ é calculado através do caudal de ar introduzido na fornalha e caudal de ar estequiométrico.

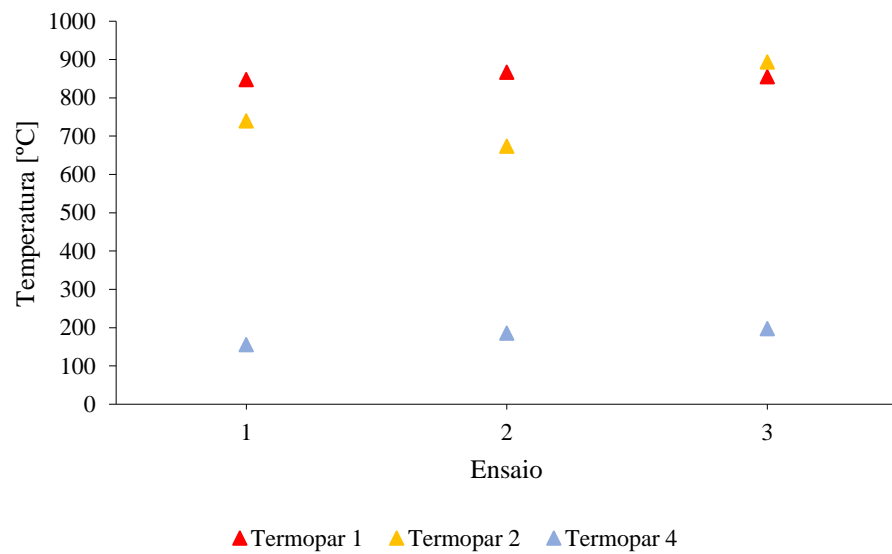


Figura 5.11. Temperaturas médias medidas nos ensaios 1, 2 e 3.

A Figura 5.12 apresenta os valores médios de caudal mássico de ar total e de biomassa para os ensaios 1, 2 e 3. A Tabela 5.8 apresenta os caudais médios totais volumétricos de ar de combustão para cada ensaio (1, 2 e 3). Os valores apresentados na Figura 5.12 e na Tabela 5.8 resultam do ajuste automático das condições de operação dos ventiladores de ar de combustão e do sem-fim de alimentação de biomassa, de modo a cumprir a parametrização imposta ao sistema de controlo.

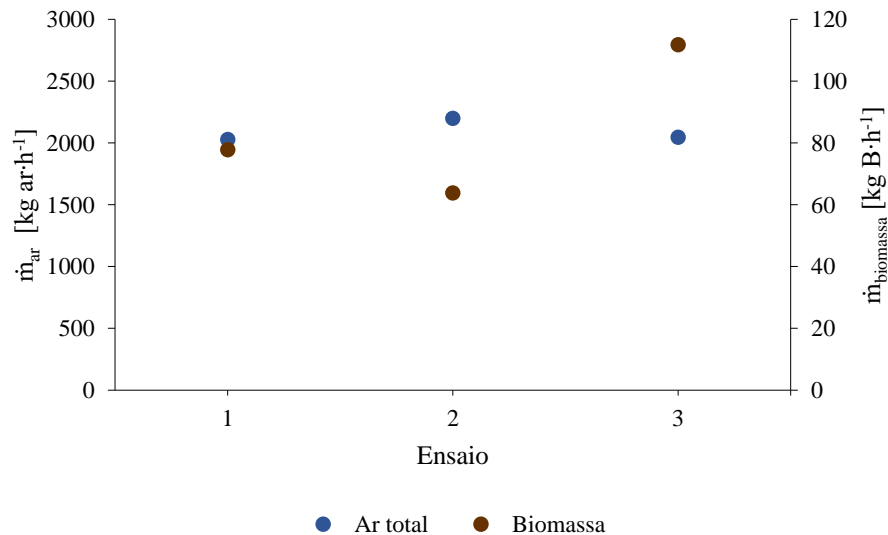


Figura 5.12. Caudais médios de ar de combustão e de combustível, para os ensaios 1, 2 e 3.

Tabela 5.8. Caudal volumétrico total do ar de combustão de cada ensaio 1, 2 e 3.

Ensaio	$\dot{V}_{ar\ total}$ [Nm ³ ·h ⁻¹]
1	1718,69
2	1863,84
3	1734,20

A Tabela 5.9 apresenta a composição do efluente gasoso (CO₂, CO, NO e O₂) para os ensaios 1, 2 e 3, bem como a sua comparação com o exigido na Portaria nº677/2009 aplicada a fornalhas/caldeira de combustão de biomassa. O processo de combustão é eficiente quando a concentração de inqueimados (por exemplo CO) no efluente gasoso é minimizada. Assim, verifica-se que o ensaio 1 é o mais eficiente, pois apresenta a menor concentração de CO.

Tabela 5.9. Composição do efluente gasoso e cumprimento da legislação para os ensaios 1, 2 e 3^{24,25}.

Ensaio	CO ₂ [% volúmica, gás seco]	CO [mg·Nm ⁻³ , @ 11% de O ₂ gás seco]	NO ²⁶ [mg·Nm ⁻³ , @ 11% de O ₂ gás seco]	O ₂ [% volúmica, gás seco]	Cumprimento da legislação
1	11,8±1,0	173±114	67±5	8,5±1,1	Conforme
2	9,0±0,9	788±349	65±3	11,4±0,9	Não conforme
3	16,0±1,2	1358±1892	58±4	4,1±1,4	Não conforme

5.1.2.3 CONCLUSÕES

A análise do efeito de excesso de ar sobre o desempenho do processo de combustão na fornalha/caldeira é um dos objetivos do Estágio. Desta forma, apesar de o sistema atuar tendo por base as respostas do equipamento de medida, este comportamento reflete a necessidade de um ajuste do sistema de controlo e operação.

Adicionalmente, observa-se que o valor de CO, no efluente gasoso, é superior no ensaio 3, comparativamente ao ensaio 1. Como o excesso de ar é menor para o ensaio 3, em relação ao ensaio 1, uma menor disponibilidade de oxidante condiciona a conversão do combustível e promove a formação de compostos inqueimados, nomeadamente o CO.

²⁴ VLE [CO] = 500 mg·Nm⁻³; VLE [NO_x] = 650 mg·Nm⁻³; Oxigénio de referência = 11% (ver Portaria nº 677/2009);

²⁵ ± Desvio-padrão.

²⁶ Expresso em NO₂ para comparação com a legislação aplicada (ver Tabela 3.3)

5.1.3 MOVIMENTAÇÃO DAS GRELHAS

5.1.3.1 MÉTODOS

A metodologia a ser apresentada tem por base as condições de operação mais adequadas para a distribuição de ar primário e para o excesso de ar, e pretende avaliar a influência da movimentação das grelhas no processo de combustão e desempenho ambiental. Deste modo, optou-se por analisar o estudo desenvolvido por Razmjoo *et al.* (2014), onde são analisadas as emissões gasosas decorrentes do processo de combustão numa fornalha com grelha *reciprocating* com uma potência de 4 MW. Dos resultados obtidos no estudo realizado por Razmjoo *et al.* (2014), verifica-se que os maiores níveis de emissão de CO estão associados às fases de secagem, desvolatilização e combustão do *char*.

Deste modo, considerando as condições mais adequadas, testadas para a distribuição de ar primário e para o excesso de ar, realizaram-se dois ensaios (II e III), com duração de 30 minutos cada, para comparação com a movimentação escolhida para as condições mais adequadas (I). Para o ensaio (II) optou-se por aumentar o ciclo de trabalho da secção 1 e 2 com o intuito de prolongar o tempo de residência da biomassa na fase de secagem e combustão do *char*, por forma a minimizar as emissões de CO. O ensaio (III) apresenta um ciclo de trabalho mais curto na zona de secagem para permitir o deslocamento da biomassa para a zona de combustão, secção onde o ciclo de trabalho será mais longo. Neste último ensaio foi aumentado o ciclo de trabalho na secção 3 para permitir a combustão completa de material que possa vir inqueimado da secção 2. A Tabela 5.10²⁷ apresenta as alterações realizadas nos ciclos de trabalho das grelhas.

Tabela 5.10. Ciclo de trabalho [s] para os ensaios (I), (II) e (III).

Ensaio	Secção (1)	Secção (2)	Secção (3)
(I)	20	40	90
(II)	30	50	90
(III)	10	70	100

5.1.3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

À semelhança do estudo realizado para avaliação do efeito dos parâmetros mencionados anteriormente, a análise da influência da movimentação das grelhas vai ser realizada através do

²⁷ O tempo de trabalho das grelhas e o período de paragem para inversão mantêm-se constantes para os três ensaios, estando presentes na Tabela 5.1.

estudo do comportamento de variáveis como a temperatura e a composição do efluente gasoso (CO e NO). A Figura 5.13 permite compreender o comportamento do CO e do NO, relativamente ao teor de O₂ seco no efluente gasoso, para os ensaios I, II e III. A Figura 5.14²⁸ apresenta a relação entre o excesso de ar total/primário e o teor de O₂ seco no efluente gasoso.

Contrariamente ao que seria de esperar, considerando o estudo desenvolvido por Razmjoo *et al.* (2014), as emissões de CO, no ensaio (II), foram superiores às emissões registadas para o ensaio de referência (I) (Figura 5.13). Da observação do processo de combustão dentro da fornalha (através de um óculo), verificou-se que, para o ensaio (II), a biomassa ficava acumulada na secção 1, uma vez que o tempo de repouso das grelhas para esta secção é superior (em 10 segundos) relativamente ao ensaio (I) (Tabela 5.11). Esta acumulação de biomassa deveria promover um aumento da perda de carga à passagem do ar primário nessa secção e, como o combustível não se deslocava para a segunda secção tão rápido como no ensaio (I), pode suceder-se que parte do processo de combustão da biomassa ocorra permanentemente na secção 1.

Comparativamente com os ensaios (I) e (II), o ensaio (III) apresenta uma média de emissão de CO mais elevada (Figura 5.13). Este resultado não está de acordo com o esperado uma vez que o ciclo de trabalho das grelhas apresentava-se bastante longo para uma das secções mais críticas para a formação de CO (zona 2 – combustão do *char*), conferindo um elevado tempo de residência para o combustível ser oxidado de forma eficiente. No entanto, uma possível justificação para este fenómeno está associada com a possibilidade de se ter formado uma acumulação de biomassa na segunda secção uma vez que o tempo de repouso na primeira secção é muito curto (ver Tabela 5.11). Esta acumulação de biomassa na segunda secção pode estar a condicionar uma mistura adequada de comburente e combustível sólido e, portanto, promover a emissão de mais inqueimados, como o CO. Para além disso, a acumulação de biomassa na segunda secção pode condicionar a passagem de ar primário, o que limita a correta oxidação do combustível, promovendo a formação de CO. Observando a Figura 5.13 e Figura 5.14, verifica-se que a movimentação das grelhas, para as condições testadas, não influencia a emissão de NO nem a estequiometria do processo, apresentando valores de razão de excesso de ar idênticos entre os vários ensaios (I, II e III) e semelhantes ao previsto com base no balanço mássico teórico ($\lambda = 2,00$).

²⁸ A relação presente na Figura 5.14 considera o teor de O₂ seco no efluente gasoso, uma vez que este é medido por métodos paramagnéticos, considerados mais fiáveis do que a sonda *lambda* (responsável pela medição do teor de O₂ húmido). O valor dado pela sonda *lambda* serve apenas como indicador, devendo esta ser calibrada consoante o excesso de ar que se pretende na fornalha. Desta forma, o teor de O₂ húmido será apenas para análise comportamental em relação ao funcionamento de outros equipamentos.

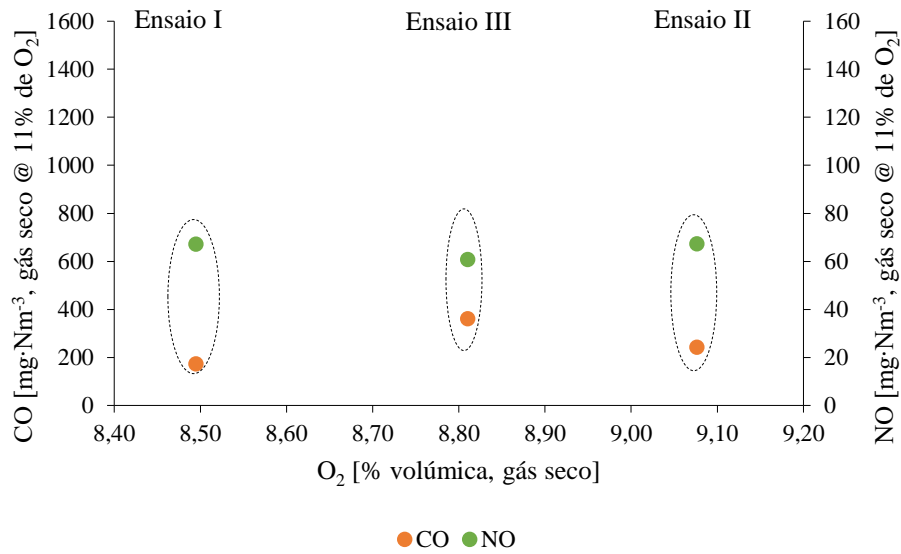


Figura 5.13. Emissões de CO e NO para os ensaios I, II e III em função do teor de O₂ seco medido no efluente gasoso.

Tabela 5.11. Tempo de repouso das grelhas [s] para os ensaios (I), (II) e (III).

Ensaio	Secção (1)	Secção (2)	Secção (3)
(I)	18	35	85
(II)	28	45	85
(III)	8	65	95

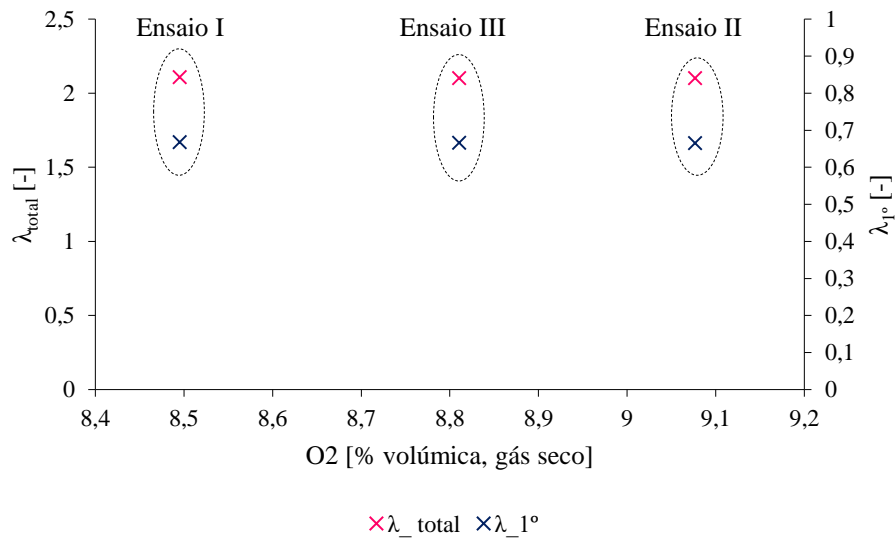


Figura 5.14. Razão de excesso de ar total e estequiometria do primeiro estágio obtidas para os ensaios I, II e III, em função do teor de O₂ seco no efluente gasoso.

A Figura 5.15 exibe os valores médios de temperatura dos gases de combustão nas várias posições seleccionadas ao longo da caldeira (ver Figura 5.1). A Figura 5.16 apresenta os valores médios para o caudal mássico total de ar e para o caudal de alimentação de biomassa à fornalha. Analisando a Figura 5.15 e a Figura 5.16, e considerando as condições testadas, observa-se que a movimentação das grelhas não surte efeito na temperatura do efluente nem na frequência de funcionamento dos motores dos ventiladores de introdução de ar e do sem-fim de alimentação.

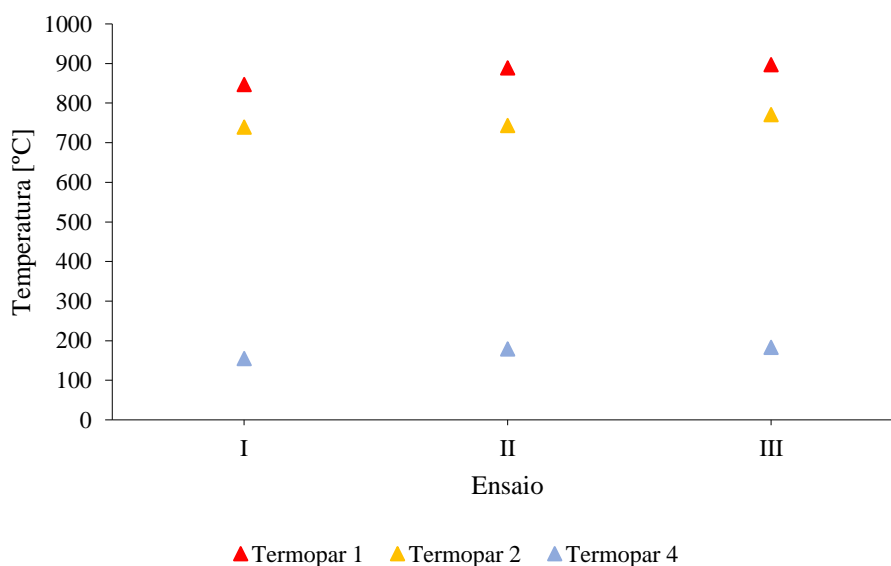


Figura 5.15. Temperaturas médias dos gases de combustão para os ensaios I, II e III.

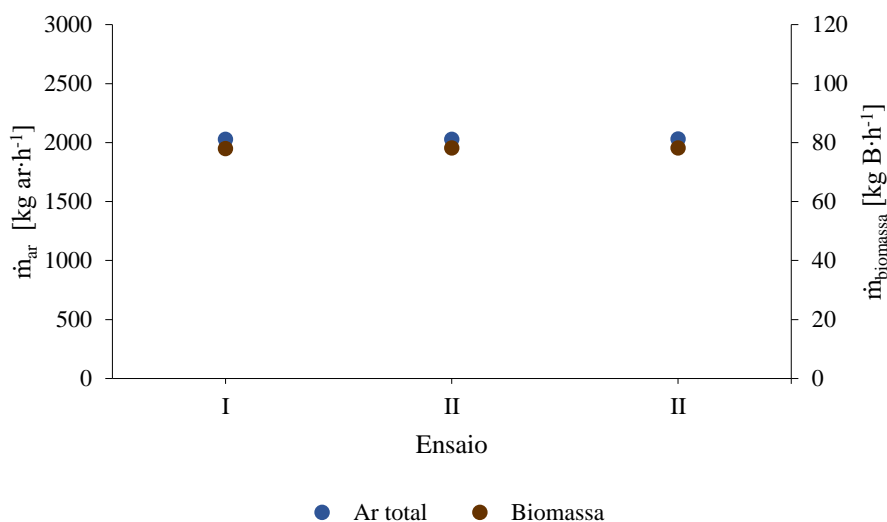


Figura 5.16. Caudais médios de ar de combustão e de combustível, para os ensaios I, II e III.

A Tabela 5.12 apresenta a composição do efluente gasoso (CO₂, CO, NO e O₂) para os ensaios I, II e III, bem como a sua comparação com os VLE para o CO e NO, que constam na Portaria nº677/2009 aplicada a fornalhas/caldeiras para combustão de biomassa. Observando a Tabela 5.12, verifica-se

que todos os ensaios apresentam valores de emissão dentro dos VLE impostos pela legislação, sendo o ensaio I o que apresenta melhor desempenho do ponto de vista ambiental.

Tabela 5.12. Composição do efluente gasoso e cumprimento da legislação para os ensaios I, II e III^{29,30}.

Ensaio	CO ₂ [% volúmica, gás seco]	CO [mg·Nm ⁻³ , @ 11% de O ₂ gás seco]	NO ³¹ [mg·Nm ⁻³ , @ 11% de O ₂ gás seco]	O ₂ [% volúmica, gás seco]	Cumprimento da legislação
I	11,8±1,0	173±114	67±5	8,5±1,1	Conforme
II	11,2±0,8	243±110	67±4	9,1±0,9	Conforme
III	11,5±1,0	361±152	61±6	8,8±1,0	Conforme

5.1.3.3 CONCLUSÕES

A movimentação das grelhas influencia o desempenho do processo de combustão, favorecendo ou limitando a extensão da reação global do processo em causa. Através dos resultados obtidos, é possível concluir-se que a alteração da movimentação das grelhas tem impacto ao nível da emissão de compostos inqueimados, nomeadamente o CO. Portanto, a movimentação das grelhas deve ser testada em função de outras variáveis operatórias (por exemplo o excesso de ar e repartição de ar por secção da grelha), com intuito de determinar a movimentação adequada de funcionamento. Os ensaios realizados evidenciaram que a movimentação das grelhas não afeta a formação de NO, a temperatura do efluente gasoso, a frequência de funcionamento dos moto-redutores dos ventiladores de introdução de ar e do sem-fim de alimentação, e a razão de excesso de ar total.

5.2 COMPORTAMENTO DA CALDEIRA

Considerando o ponto encontrado para as condições de operação mais adequadas, obtidas da conjugação das três variáveis estudadas (distribuição de ar primário, excesso de ar e movimentação das grelhas), apresenta-se agora o desempenho da fornalha ao longo do tempo. Assim, serão expostas as relações entre os diversos gases maioritários da composição do efluente gasoso, perfis de

²⁹ VLE [CO] = 500 mg·Nm⁻³; VLE [NO_x] = 650 mg·Nm⁻³; Oxigénio de referência = 11% (ver Portaria n.º 677/2009);

³⁰ ± Desvio-padrão.

³¹ Expresso em NO₂ para comparação com a legislação aplicada (ver Tabela 3.3)

temperatura dos gases de combustão e da água, a alimentação, introdução de ar e Oxigénio húmido, depressão e a potência térmica útil no fluido de trabalho (água).

5.2.1 PERFIL DA COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE GASOSO AO LONGO DO TEMPO

O estudo completo do comportamento de um sistema de combustão passa pela monitorização dos gases presentes no efluente gasoso, com intuito de compreender relação entre eles e de perceber a influência destes no processo de combustão. A Figura 5.17 apresenta o perfil do CO₂, CO e O₂ em função do tempo, para o ponto obtido das condições de operação mais adequadas (Ensaio A = 1 = I).

A formação de CO está dependente de três fatores-chave: temperatura, turbulência e tempo de residência. Desta forma, a temperatura é inversamente proporcional à formação de CO, a turbulência deve ser suficiente para permitir uma mistura adequada do ar/combustível, promovendo uma combustão completa, e o tempo de residência deve ser elevado por forma a possibilitar a conversão total dos reagentes em produtos finais (Van Loo & Koppejan, 2008). Observando a Figura 5.17, verifica-se que, para os três ensaios selecionados, os perfis de O₂ e de CO seguem o mesmo comportamento. Assim, depreende-se que a variação de O₂ esteja relacionada com excesso de ar a um nível elevado, o que pode um aumento da turbulência, com possível diminuição do tempo de residência dos gases, apresentando, deste modo, condições para a formação de CO.

De acordo com García *et al.* (2012), o processo de combustão de biomassa pode ser descrito como a dissociação do biocombustível, na presença de um comburente, em Dióxido de Carbono e água. Assim, por cada x moles de Oxigénio consumido são produzidas y moles de Dióxido de Carbono. Logo, o comportamento apresentado por estes gases está de acordo com a reação global de combustão.

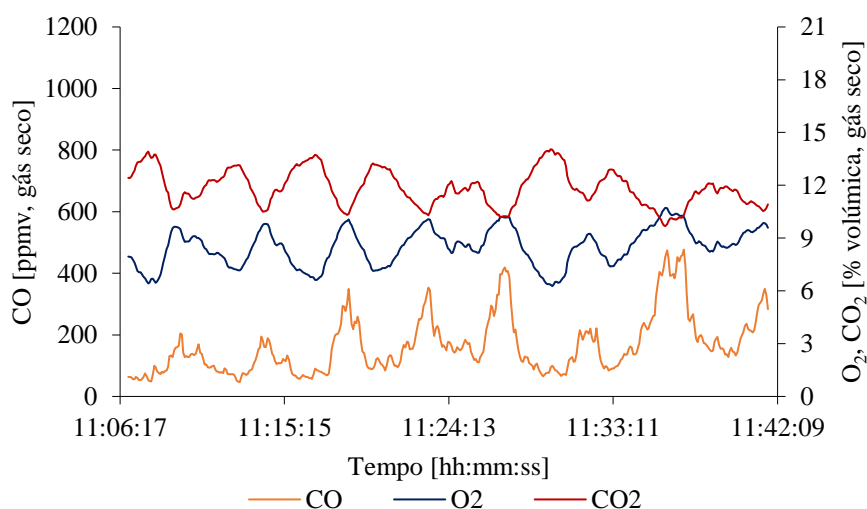


Figura 5.17. Perfil de CO, CO₂ e O₂, em função do tempo, para o ensaio com as condições de operação mais adequadas.

A Figura 5.18 apresenta o perfil de NO e O₂, em função do tempo, para o ensaio com as condições de operação mais adequadas. O NO é formado por três mecanismos distintos: *Thermal-NO*, *Prompt-NO* e *Fuel-NO*. A formação de *thermal-NO* é bastante reduzida uma vez que as fornalhas, por norma, não atingem temperaturas muito elevadas (Oberberger *et al.*, 2006). A formação de NO pelo mecanismo imediato (*prompt*) é altamente dependente da presença de radicais de hidrocarbonetos. Uma vez que a taxa de oxidação do combustível é rápida, a concentração de radicais de hidrocarbonetos apresenta-se bastante reduzida, tornando a reação do radical de hidrocarboneto com o azoto atmosférico negligenciável (Flagan & Seinfeld, 1988). Assim, no processo de combustão de biomassa, o Azoto ligado ao biocombustível é o principal agente para a formação de NO (Nussbaumer, 2003; Oberberger, 1998).

Observando a Figura 5.18, verifica-se que, para os três ensaios seleccionados, os perfis de O₂ e de NO têm comportamentos distintos, ou seja, quando o teor de O₂ cresce, a concentração de NO decresce. Esta situação pode estar associada ao excesso de ar elevado, que provoca a oxidação do N-combustível, seguida da redução do NO a NH na presença de O, H, OH (ver Figura 3.8).

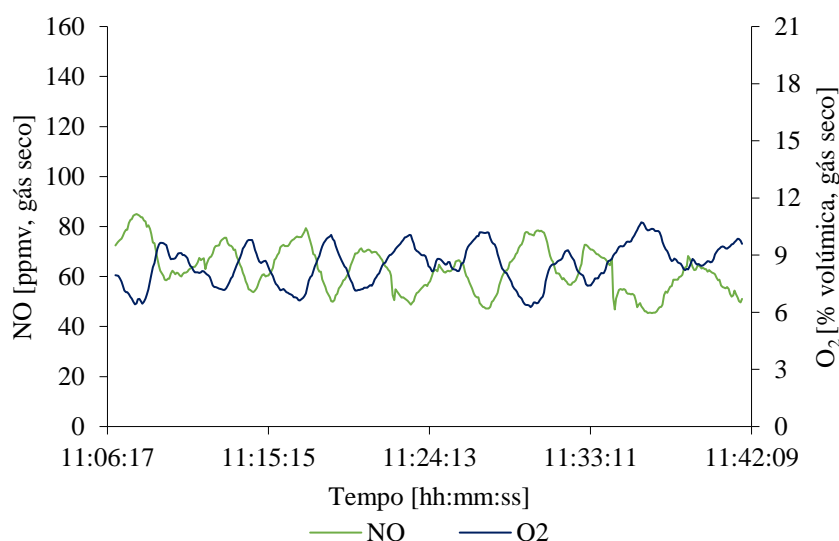


Figura 5.18. Perfil de NO e O₂, em função do tempo, para o ensaio com as condições de operação mais adequadas.

5.2.2 PERFIL DE TEMPERATURA

A temperatura é um parâmetro de extrema importância no processo de combustão, uma vez que afeta a extensão das reações, promovendo a oxidação do combustível. Desta forma, a Tabela 5.13 exhibe os valores médios obtidos para cada um dos sensores de temperatura. A Tabela 5.14 ostenta os valores de temperatura médios medidos na água de entrada e de saída. A Figura 5.19 apresenta o perfil de temperatura observado para o ensaio em estudo, onde são expostos os valores associados

aos diferentes termopares acoplados ao sistema (ver Figura 5.1) e a Figura 5.20 exhibe o perfil de temperatura na água de entrada (no permutador vertical – água “fria”) e na água de saída (no permutador horizontal – água “quente”). A Tabela 5.13, a Tabela 5.14, Figura 5.19 e a Figura 5.20 evidenciam a permuta de calor entre os gases e a água, no percurso da caldeira. A flutuação no termopar 2 está relacionada com o facto de este estar posicionado num local de permuta de calor, o que se traduz em variações acentuadas de temperatura.

Tabela 5.13. Valores médios de temperatura nos vários pontos de amostragem.

Termopar 1 [°C]	Termopar 2 [°C]	Termopar 3 [°C]	Termopar 4 [°C]	Termopar 5 [°C]
847,4	739,4	612,7	155,2	144,2

Tabela 5.14. Temperatura média da água.

T _{água_entrada} [°C]	T _{água_saída} [°C]
61,46	68,41

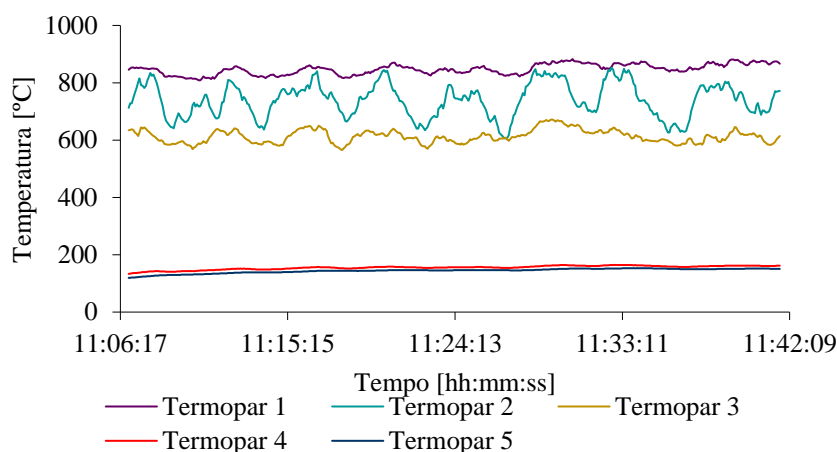


Figura 5.19. Perfil de temperatura na caldeira.

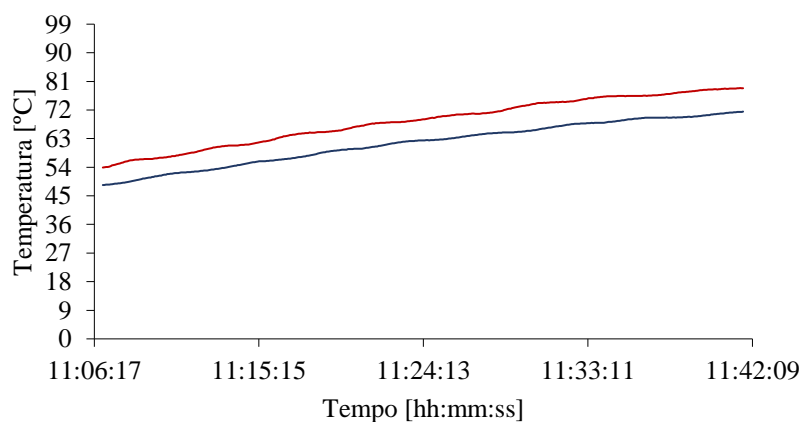


Figura 5.20. Perfil de temperatura na água.

5.2.3 ALIMENTAÇÃO, INTRODUÇÃO DE AR E OXIGÉNIO

O processo de combustão é condicionado por diversos fatores, incluindo o caudal de alimentação à fornalha e o caudal de ar introduzido na caldeira. Deste modo, considerando a calibração realizada ao sem-fim de alimentação, a Tabela 5.15 apresenta o caudal médio de alimentação à fornalha o caudal médio de ar de combustão introduzido na caldeira.

Tabela 5.15. Valores médios para os caudais de biomassa e de ar de combustão.

$\dot{m}_{biomassa}$ [kg B · h ⁻¹]	$\dot{V}_{ar\ primário}$ [Nm ³ · h ⁻¹]	$\dot{V}_{ar\ secundário/terciário}$ [Nm ³ · h ⁻¹]	$\dot{V}_{ar\ total}$ [Nm ³ · h ⁻¹]
77,88	544,55	1174,14	1718,69

A Figura 5.21 exibe a relação entre o teor de Oxigénio húmido medido pela sonda *lambda* e a frequência de funcionamento do moto-redutor do sem-fim de alimentação, em função do tempo e a Figura 5.22 apresenta a relação entre o teor de Oxigénio húmido medido pela sonda *lambda* e a frequência de funcionamento do moto-redutor do ventilador de introdução de ar, em função do tempo.

A gestão do processo de combustão é realizada através de um algoritmo que controla a introdução de combustível e ar na fornalha, em função do intervalo estabelecido para o O₂ (gás húmido) nos gases de combustão ($Y_{O_2, \min}$ e $Y_{O_2, desejado}$), temperatura máxima da água de saída da caldeira ($T_{H_2O, out}$) e pelo diferencial de temperatura máxima permitido na água (ΔT_{H_2O}). Desta forma, observando a Figura 5.21 e a Figura 5.22, verifica-se que o sistema, quando a percentagem de O₂ desejada está acima do valor imposto, corrige a entrada de ar e/ou combustível na fornalha.

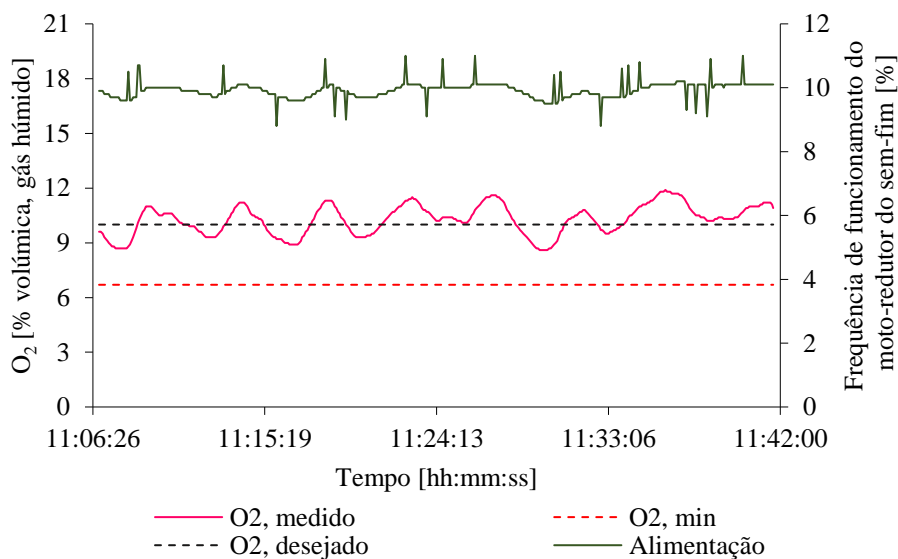


Figura 5.21. Relação entre o teor de oxigénio húmido medido pela sonda *lambda* e a frequência de funcionamento do moto-redutor do sem-fim de alimentação, em função do tempo.

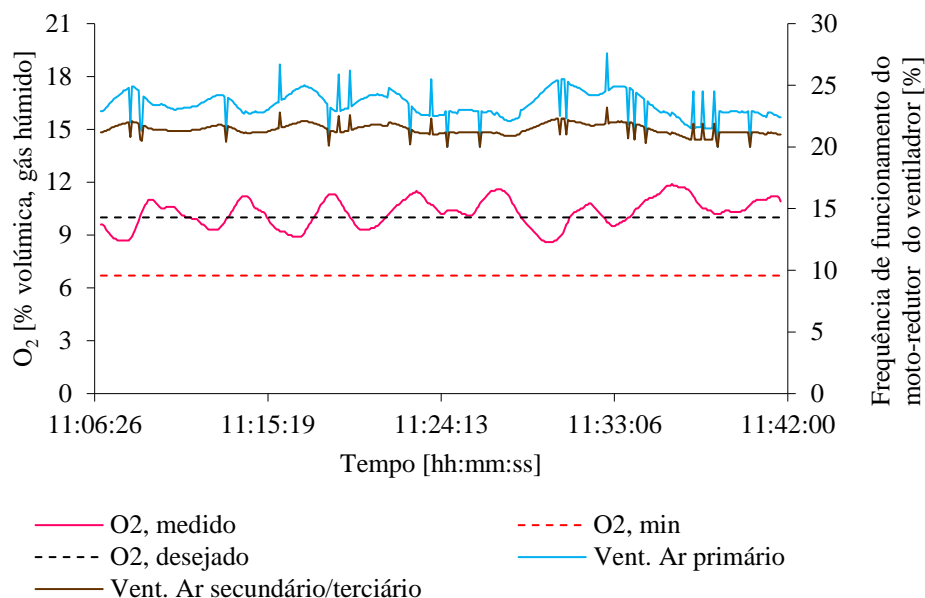


Figura 5.22. Relação entre o teor de Oxigénio húmido medido pela sonda *lambda* e a frequência de funcionamento do moto-redutor do ventilador de introdução de ar, em função do tempo

5.2.4 PERFIL DA DEPRESSÃO NA FORNALHA

A Figura 5.23 apresenta o perfil da depressão medida na fornalha, para o ensaio com as condições de operação mais adequadas. A caldeira em estudo foi desenvolvida com o intuito de favorecer uma combustão em depressão, tendo em vista dois objetivos principais: evitar o risco de retorno de chama e permitir a extração dos gases de combustão. Deste modo, através da Figura 5.23, verifica-se que, apesar de serem observadas flutuações, o sistema está a operar com a depressão imposta, apresentando um valor médio de 1 mbar.

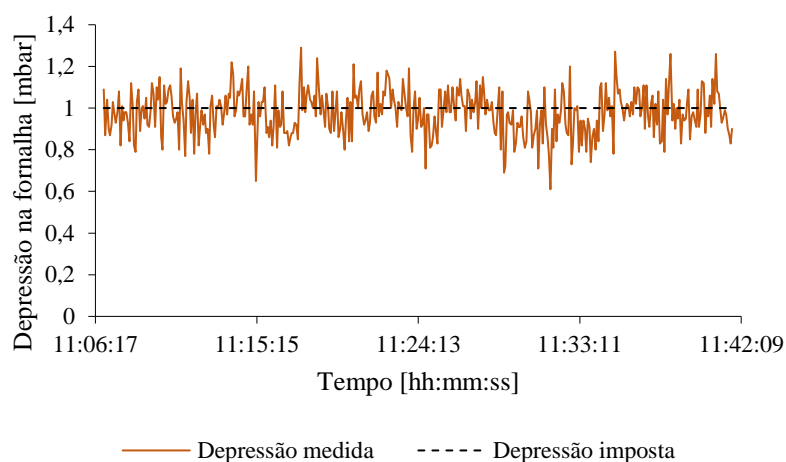


Figura 5.23. Depressão na fornalha.

5.2.5 PERFIL DA POTÊNCIA TÉRMICA DO SISTEMA DE COMBUSTÃO

A Figura 5.24 apresenta o perfil de potência térmica do sistema de combustão, para o ensaio escolhido. O sistema operou em modo automático e o calor foi dissipado para a atmosfera, sendo o caudal médio da água de $34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Desta forma, a potência na água é determinada através da equação 7, sendo a potência média da água 274 kW.

$$\dot{Q}_{\text{água}} = \dot{V}_{\text{água}} \times \rho_{\text{água}} \times c_{p, \text{H}_2\text{O}, \text{liq}} \times (T_{\text{água de saída}} - T_{\text{água de entrada}}) \times 10^{-3} \quad (7)$$

Onde:

- $\dot{Q}_{\text{água}} \rightarrow$ Potência na água [$\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ou kW];
- $\dot{V}_{\text{água}} \rightarrow$ Caudal de água aquecida [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$];
- $\rho_{\text{água}} \rightarrow$ Massa volúmica da água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
- $c_{p, \text{H}_2\text{O}, \text{liq}} \rightarrow$ Calor específico médio da água líquida [= $4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O} \cdot \text{K}^{-1}$];

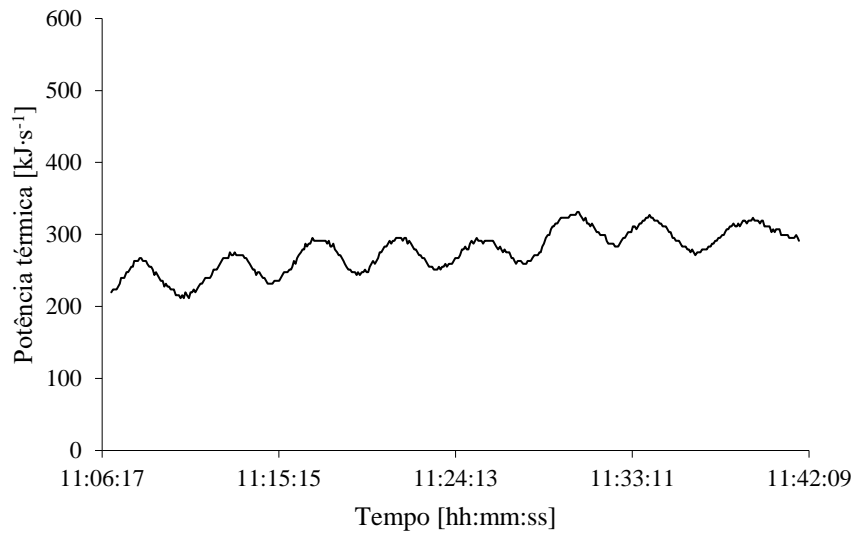


Figura 5.24. Potência do sistema.

6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões do estudo realizada durante o Estágio e enunciadas algumas propostas de trabalho futuro.

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

O Estágio teve como objetivos práticos compreender o funcionamento do sistema de uma caldeira Ventil e analisar a influência de três parâmetros distintos: distribuição de ar primário; excesso e de ar e movimentação das grelhas. Neste sentido, foram realizados mais de 30 ensaios, dos quais se concluiu que:

- A diminuição do caudal de ar primário na segunda secção e o aumento na terceira pode fomentar a produção de CO;
- A produção adicional de NO no ensaio B pode estar associada a uma estequiometria do primeiro estágio muito elevada e do possível arrastamento de material combustível da grelha para o segundo estágio, por ação da movimentação das grelhas e excesso de escoamento de ar primário;
- Através da análise realizada, conclui-se que, para que a combustão seja eficiente, é necessário que o caudal de ar na segunda secção seja superior ao caudal de ar nas restantes secções, por forma a assegurar a combustão completa do *char*;
- A análise do efeito de excesso de ar sobre o desempenho do processo de combustão na fornalha/caldeira é um dos objetivos do Estágio. Desta forma, apesar de o sistema atuar tendo por base as respostas do equipamento de medida, este comportamento reflete a necessidade de um ajuste do sistema de controlo e operação;
- Adicionalmente, observa-se que o valor de CO, no efluente gasoso, é superior no ensaio 3, comparativamente ao ensaio 1. Como o excesso de ar é menor para o ensaio 3, em relação ao ensaio 1, uma menor disponibilidade de oxidante condiciona a conversão do combustível e promove a formação de compostos inqueimados, nomeadamente o CO;
- A movimentação das grelhas influencia o desempenho do processo de combustão, favorecendo ou limitando a extensão da reação global do processo em causa. Através dos resultados obtidos, é possível concluir-se que a alteração da movimentação das grelhas tem impacto ao nível da emissão de compostos inqueimados, nomeadamente o CO;

- Portanto, a movimentação das grelhas deve ser testada em função de outras variáveis operatórias (por exemplo o excesso de ar e repartição de ar por secção da grelha), com intuito de determinar a movimentação adequada de funcionamento;
- Os ensaios realizados evidenciaram que a movimentação das grelhas não afeta a formação de NO, a temperatura do efluente gasoso, a frequência de funcionamento dos moto-redutores dos ventiladores de introdução de ar e do sem-fim de alimentação, e a razão de excesso de ar total.

Com o intuito de promover condições de combustão ideais, é essencial a conjugação dos diversos parâmetros de forma equilibrada, considerando sempre as características do material a queimar e a tipologia do sistema de combustão.

O Estágio na Ventil-Engenharia do Ambiente, Lda permitiu o contacto com a dinâmica deste universo industrial, nas suas diversas temáticas. Focalizando a atenção nos sistemas de combustão, foi apreendido não só o conhecimento subjacente a este tipo de processo, mas também a forma como se controlam os diversos parâmetros da caldeira e se monitorizam as imensas variáveis. Este período de aprendizagem prática promoveu o crescimento da aluna ao nível dos saberes fundamentais – ser, fazer e estar – podendo ser visto como uma inequívoca mais valia para a formação integral (académica, profissional e pessoal).

Ao desejar este Estágio, a aluna aglutina as suas preocupações de carácter ambiental, com a presente necessidade de responder ao desenvolvimento industrial e económico que o mundo atual enfrenta, em paralelo com o equilíbrio sustentável. A empresa Ventil-Engenharia do Ambiente favoreceu o bem-estar da aluna, na sua qualidade de estagiária, criando oportunidades de aprendizagens produtivas e esclarecedoras, em ambiente de responsabilidade, onde a cultura e a visão da empresa imperam.

6.2 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise do processo de combustão integra uma matriz de parâmetros complexa, sendo por isso inviável a avaliação de todas as variáveis do sistema. No entanto, é essencial testar o máximo de parâmetros possível, tendo em vista a sustentabilidade do sistema de combustão a biomassa. Assim, são apresentadas possíveis propostas para trabalho futuro:

- Utilização de biocombustíveis com menor qualidade;
- Análise da influência da variação de caudal de ar secundário;

- Avaliação do efeito da variação de caudal de ar terciário;
- Análise da variação da repartição de ar primário/secundário/terciário;
- Estudo aprofundado do sistema de permuta de calor, tendo em vista a otimização da transferência de calor;
- Análise da eficiência do sistema de despoeiramento;
- Comparação do desempenho de uma caldeira com grelhas móveis e um sistema de combustão com grelhas fixas;

Para além das sugestões apresentadas, propõe-se a melhoria do sistema de controlo da caldeira, por forma a evitar instabilidade nos parâmetros impostos, e uma análise pormenorizada de todo o sistema da caldeira.

Referências

A

- Abbasi, T. & Abbasi, S. A. (2010) 'Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 919-937.
- Abuelnuor, A. A. A., Wahid, M. A., Hosseini, S. E., Saat, A. & Saqr, K. M. (2014) 'Characteristics of biomass in flameless combustion: A review'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp. 363-370.
- Antunes, F. J. M. & Matos, M. A. A. (2007) Separação Ciclónica. Apontamentos Teóricos da Unidade Curricular Engenharia de Sistemas de Tratamento I do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.
- APA (2017) Emissões Atmosféricas. Consultado em: <https://www.apambiente.pt> (acedido em março de 2017)

B

- Boningari, T & Smirniotis, P. G. (2016) 'Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement'. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 13, pp. 133-141-
- Boriouchkine, A., Zakharov, A. & Jämsä-Jounela, S. (2012) 'Dynamic modelling of combustion in a BioGrate furnace: The effect of operation parameters on biomass firing'. *Chemical Engineering Science*, 69, pp. 669-678.

C

- Carroll, J. P. & Finnan, J. (2012) 'Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws'. *Biosystems Engineering*, 112, pp. 151-159.
- Coelho, P. & Costa, M. (2012) *Combustão*, Amadora, Edições Orion, ISBN: 978-972-8620-10-3.

D

- Dahl, J. & Obernberger, I. (2004) 'Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo Donax*, *Cynara Cardunculus*, *Miscanthus X Giganteus* and *Panicum Virgatum*)'. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, pp. 1265-1270.

Dahlquist, Erik. (ed.) (2013) *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy – Combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation*. Boca Raton, CRC Press: Taylor & Francis Group.

Demirbas, A. (2005) 'Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues'. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, pp. 171-192.

Djurović, D., Nemoda, S., Dakić, D., Adzić, M. & Repić, B. (2012) 'Furnace for biomass combustion – Comparison of model with experimental data'. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, pp. 4312-4317.

E

Erol, M., Haykiri-Acma, H. & Küçükbayrak, S. (2010) 'Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data'. *Renewable Energy*, 35, pp. 170-173.

F

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017) *Energy*. Consultado em: <http://www.fao.org/energy/bioenergy/en/>, acedido em março de 2017.

FFonseca (2015) Guião técnico de sondas. Soluções para Vanguarda.

Flagan, R. C. & Seinfeld, J. H. (1988) *Fundamentals of Air Pollution Engineering*. New Jersey, Prentice Hall, California Institute of Technology.

Fournel, S., Palacios, J. H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M. & Savoie, P. (2015) 'Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops'. *Applied Energy*, 141, pp. 247-259.

G

García, R., Pizarro, C., Lavin, A. G. & Bueno, J. L. (2012) 'Characterization of Spanish biomass wastes for energy use'. *Bioresource Technology*, 103, pp. 249-258.

García, R., Pizarro, C., Lavin, A. G. & Bueno, J. L. (2014a) 'Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data'. *Fuel*, 117, pp. 1130-1138.

García, R., Pizarro, C., Lavin, A. G. & Bueno, J. L. (2014b) 'Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data'. *Fuel*, 117, pp. 1139-1147.

Glarborg, P., Jensen, A. D., Johnsson, J. E. (2003) 'Fuel nitrogen conversion in solid fired systems'. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, pp. 89-113.

H

Hermansson, S., Lind, F. & Thunman, H. (2011) 'On-line monitoring of fuel moisture-content in biomass-fired furnaces by measuring relative humidity of the flue gases'. *Chemical Engineering and Design*, 89, pp. 2470-2476.

Hrdlička, J., Skopec, P., Dlouhý, T. & Hrdlička, F. (2016) 'Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels'. *Fuel*, 165, pp. 68-74

J

Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles Jr, T. R. & Miles, T. R. (1998) 'Combustion properties of biomass'. *Fuel Processing Technology*, 54, pp. 17-46.

K

Khan, A. A., de Jong, W. Jansens, P. J. & Spliethoff, H. (2009) 'Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies'. *Fuel Processing Technology*, 90, pp. 21-50.

Kraszkiewicz, A., Przywara, A., Kachel-Jakubowska, M. & Lorencowicz, E. (2015) 'Combustion of plant biomass pellets on the grate of a low power boiler'. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7, pp. 131-138.

L

Levy, R. J. (2015) 'Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern'. *Neurotoxicology and Teratology*, 49, pp. 31-40.

Li, J., Paul, M. C., Younger, P. L., Watson, I., Hossain, M. & Welch, S. (2015) 'Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model'. *Applied Energy*, 156, pp. 749-755.

M

Matos, M. A. A. (2015) Propriedades de gases e líquidos. Apontamentos Teóricos da Unidade Curricular Processos Físico-Químicos e Biológicos do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.

McKendry, P. (2002a) 'Energy production from biomass (part 1): overview of biomass'. *Bioresource Technology*, 83, pp. 37-46.

McKendry, P. (2002b) Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83, pp. 47-54.

Ministério da Economia e Emprego (2013) Decreto-Lei nº 39/2013. *Diário da República*, 1 (52), pp. 1691-1709.

Ministérios das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente (2004) Decreto-Lei nº 78/2004. *Diário da República*, 1-A (80), pp. 2136-2148.

Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, da Economia e da Inovação e da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas (2009) Portaria n.º 675/2009. *Diário da República*, 1 (119), pp. 4108-4111.

Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, da Economia e da Inovação e da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas (2009) Portaria n.º 677/2009. *Diário da República*, 1 (119), pp. 4112-4116.

N

Nussbaumer, T. (2003) 'Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction'. *Energy & Fuels*, 17, pp. 1510-1521.

O

Obernberger, I. (1998) 'Decentralized Biomass Combustion: State of the Art and Future Development'. *Biomass and Bioenergy*, 14 (1), pp. 33-56.

Obernberger, I., Brunner, T. & Bärnthaler, G. (2006) 'Chemical properties of solid biofuels – significance and impact'. *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 973-982.

Q

Quaak, P., Knoef, H. & Stassen, H. (1999) *Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies*. Energy Series nº 422, Washington, D. C., The World Bank.

R

Razmjoo, N., Sefidari, H. & Strand, M. (2014) 'Characterization of hot gas in a 4 MW reciprocating grate boiler'. *Fuel Processing Technology*, 124, pp. 21-27.

Rosendahl, L. (ed.) (2013) *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited.

Roy, M. M., Dutta, A. & Corscadden, K. (2013) 'An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace'. *Applied Energy*, 108, pp. 298-307.

S

- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S. & Mekhilef, S. (2011) 'A review on biomass as a fuel for boilers'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 2262-2289.
- Sartor, K., Restivo, Y., Ngendakumana, P. & Dewallef, P. (2014) 'Prediction of SO_x and NO_x emissions from a medium size biomass boiler'. *Biomass and Bioenergy*, 65, pp. 91-100.
- Sun, R., Ismail, T. M., Ren, X. & El-Salam, M. A. (2015) 'Numerical simulation of gas concentration and dioxin formation for MSW combustion in a fixed bed'. *Journal of Environmental Management*, 157, pp. 111-117.

T

- Tarelho, L. (2016) Tecnologias de Combustão de Biomassa. Apontamentos Teóricos da Unidade Curricular Conversão de Energias Renováveis do Mestrado em Sistemas Energéticos Sustentáveis e do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.

U

- United Nations (ed.) (1997) *Glossary of Environment Statistics*. Series F, Nº.67, New York. ISBN: 92-1-161386-8.
- União Europeia. (2015) Diretiva (UE) 2015/2193 do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de novembro de 2015 relativa à limitação das emissões para a atmosfera de certos poluentes provenientes de médias instalações de combustão. *Jornal Oficial da União Europeia*, 313, pp. 1-19.

V

- Van Den Broek, R., Faaij, A. & Van Wijk, A. (1996) 'Biomass Combustion for Power Generation'. *Biomass and Bioenergy*, 11 (4), pp. 271-281.
- Van Loo, S. & Koppejan, J. (ed.) (2008) *Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London, Earthscan.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. (2010) 'An overview of chemical composition of biomass'. *Fuel*, 89, pp. 913-933.
- Ventil – Engenharia do Ambiente. (2015) Caldeiras Ventil: Sistemas de produção de energia térmica a partir de biomassa. *Manual de Instruções, Manutenção e Operação*.

Ventil – Engenharia do Ambiente (2016) Consultado em: www.ventil.pt (acedido em março de 2017).

Ventil – Engenharia do Ambiente. (2017) Projecto PLUG & HEAT: Sistema compacto de média potência para a produção de energia térmica a partir de biomassa. *Relatório – Dossier de Produto*.

W

WHO (2008) World Health Organization. Indoor Air Pollution – Children’s Health and the Environment. *Training for the health sector*.

World Energy Council (2016) *World Energy Resources 2016*

Y

Yin, C., Rosendahl, L. A. & Kær, S. K. (2008) ‘Grate-firing of biomass for heat and power production’. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, pp. 725-754.

Yilmaz, S. & Selim, H. (2013) ‘A review on the methods for biomass to energy conversion systems design’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, pp. 420-430.

Z

Žandeckis, A., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M. & Blumberga, D. (2013) ‘Experimental study on the optimisation of staged air supply in the retort pellet burner’. *Agronomy Research*, 11(2), pp. 381-390.

Zhang, X., Chen, Q., Bradford, R., Sharifi, V. & Swithenbank, J. (2010) Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler. *Fuel Processing Technology*, 91, pp. 1491-1499.